

# 开放性公共场所疏散引导人布局优化研究 ——以上海市徐汇区滨江绿地空间为例

牛妍妍<sup>1</sup>, 於家<sup>1,2\*</sup>, 陆大伟<sup>1</sup>, 穆仁武<sup>1</sup>, 温家洪<sup>1</sup>

(1. 上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200234;

2. 上海师范大学“数字人文资源建设与研究”重点创新团队, 上海 200234)

**摘要:**应急疏散引导在城市开放性公共场所安全建设中有着重要的意义。为解决应急疏散初期引导人的空间布局问题, 论文考虑障碍物对通视性的影响、引导人的空间覆盖范围及距离衰减效应、可引导人员数量阈值等条件, 基于粒子群算法和渐进覆盖模型, 构建了一种新的开放性公共场所疏散引导人布局优化方法; 并以上海市徐汇区滨江绿地空间为例, 进行疏散引导人的布局优化, 并基于疏散智能体模型, 开展应急疏散引导模拟, 比较优化前后的疏散效率, 来验证该方法的可行性; 同时, 考虑到不同时间段人群分布的差异性, 开展该区域内疏散引导人责任区的动态规划。实证结果表明: 不同时刻研究区的疏散引导人需求量不同, 与疏散人员数量成正比; 疏散引导人布局优化后的疏散时间成本要远低于人为布设情景下的疏散时间成本; 疏散引导人责任区的划分有助于在引导人数量有限的情况下, 明确每个引导人负责的区域以及采取的日常安全防范方式。研究可为开放性公共场所疏散引导人空间布设提供决策依据, 降低公共场所的潜在安全风险, 促进城市公共安全建设。

**关键词:**开放性公共场所; 疏散引导人; 粒子群算法; 渐进覆盖模型; 上海市

开放性公共场所(如步行街、公共绿地、城市广场等)作为一种免费并全天开放的公共服务性场所, 一般具有较好的自然或人文景观, 可为城市居民提供休憩娱乐空间。同时, 开放性公共场所由于边界开放, 人群的聚散具有实时动态性、流动性强的特点, 相比一般的公共场所更易出现人群局部或全局的聚集, 增加潜在的安全风险<sup>[1]</sup>。开放性公共场所内各类突发事件的发生, 如近些年频繁发生的人群踩踏事件、恐怖袭击事件等, 对城市居民的生命与财产安全造成巨大的损害。为了推进安全城市的建设, 提高开放性公共空间的应急管理能力和及时有效的应急疏散引导是在突发事件发生时避

免或减少公共场所人员伤亡的关键之一<sup>[3-4]</sup>。

在应急疏散引导方面, 国内外学者开展了一系列的研究。Bayram等<sup>[5]</sup>研究论证了应急疏散引导中应急疏散路径规划的重要性; 崔喜红等<sup>[6]</sup>、Abdelghany等<sup>[7]</sup>分别基于禁忌搜索算法和遗传算法来优化疏散引导路径。还有部分学者致力于应急疏散引导过程的研究。如钟少波等<sup>[8]</sup>应用社会力模型和多智能体技术进行应急疏散引导过程的模拟; 陈长坤等<sup>[9]</sup>、Kirchner等<sup>[10]</sup>则基于元胞自动机模型, 考虑到危险源、应急疏散出口、疏散人员的从众行为等影响因素, 对疏散过程进行仿真。以上研究主要是对于应急疏散引导过程的探索, 较少考虑在应急疏

收稿日期: 2022-05-27; 修订日期: 2022-08-20。

基金项目: 国家自然科学基金项目(72074151); 上海自然科学基金项目(20ZR1441500); 国家社会科学基金项目(18ZDA105)。

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 72074151; Natural Science Foundation of Shanghai, No. 20ZR1441500; National Social Science Foundation of China, No. 18ZDA105.]

第一作者简介: 牛妍妍(1998—), 女, 山西吕梁人, 硕士生, 研究方向为应急疏散引导及管理。

E-mail: 1000495338@smail.shnu.edu.cn

\*通信作者简介: 於家(1982—), 男, 上海人, 博士, 教授, 研究方向为空间优化与选址、应急疏散管理与避难、基于人工智能的空间建模。E-mail: yujia@shnu.edu.cn

引用格式: 牛妍妍, 於家, 陆大伟, 等. 开放性公共场所疏散引导人布局优化研究: 以上海市徐汇区滨江绿地空间为例 [J]. 地理科学进展, 2023, 42(2): 301-315. [Niu Yanyan, Yu Jia, Lu Dawei, et al. Allocation optimization of evacuation leaders in open public places: A case study of Binjiang Green Space in Xuhui District, Shanghai. Progress in Geography, 2023, 42(2): 301-315.]  
DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.02.008

散引导开始时,对于疏散引导人空间布局的研究。

疏散引导人是指熟悉公共空间内部结构及疏散出口、疏散路径等特征,能够在应急疏散过程中及时引导疏散人员快速撤离的工作人员。由于突发事件情景下疏散人员的恐慌情绪、对开放性公共场所不熟悉等原因,疏散过程中存在较大的疏散风险。为使开放性公共场所内尽可能多的人员得到引导,疏散引导人的合理空间布局对于开放性公共场所的有效疏散至关重要。在疏散引导人相关研究中,李强等<sup>[11]</sup>在研究公共场所疏散引导人的作用时发现,在疏散人员密集区域设置疏散引导人可以有效地提高疏散引导的效率,同时也初步探讨了疏散引导人的数量、位置等对疏散效率的影响。Cao等<sup>[12]</sup>在研究中也论证了合理的疏散引导人空间布局优化可以有效缩短应急疏散的时间成本。在疏散引导人空间布局研究中,一般要考虑疏散引导人数量、引导范围、疏散引导人位置、引导对象等因素,这与公共服务设施选址问题具有较高的相似度。对于公共服务设施选址问题的研究常用拉格朗日松弛算法<sup>[13]</sup>、贪婪算法<sup>[14]</sup>、遗传算法<sup>[15]</sup>、模拟退火算法<sup>[16]</sup>、蚁群算法<sup>[17]</sup>、粒子群算法<sup>[18-20]</sup>等启发式算法<sup>[21]</sup>以及多目标进化算法<sup>[22-23]</sup>。启发式算法能够很好地结合定性定量问题,满足多目标决策的需求,因此已被应用到相关研究中。例如,Zhou等<sup>[24]</sup>以北京地铁站为例,提出一种改进的最大覆盖模型来对疏散引导人的数量和初始位置进行优化;崔喜红等<sup>[13]</sup>使用拉格朗日松弛算法结合最大覆盖问题开展了静态引导人空间布局的研究,并通过模拟超市应急疏散过程,证实了合理的疏散引导人空间布局有利于应急疏散效率的提高。但是目前疏散引导人空间布局研究仍然存在以下2个方面问题:①在疏散引导中,障碍物会对引导人视域范围产生影响,进而影响引导人在引导中的覆盖范围,而当前的研究较少考虑这方面的因素;②在实际引导过程中,引导人对疏散人员的引导作用会随两者间距离的增加而减弱,而目前的研究未考虑引导人与疏散人员间距离因素的影响。

基于上文的分析,本文考虑障碍物对疏散引导中通视性的影响、引导人的空间覆盖范围及距离衰减效应、可引导人员数量阈值(引导人最多可引导疏散人员数量)等多种因素,提出一种基于粒子群算法和渐进覆盖选址模型的开放性公共场所疏散引导人空间布局方法;以上海市徐汇区滨江绿地空间为研究区,对疏散引导人空间布局进行优化,并

基于疏散智能体模型,开展应急疏散引导模拟,比较疏散引导人布局优化前后疏散效率,验证该方法的可行性与有效性。另外,考虑不同时间段人群分布的差异,开展该区域内疏散引导人责任区的动态规划,以期为该区域的公共安全与应急管理提供决策建议。本文的研究方法可为类似的开放性公共场所疏散引导人空间布局和应急疏散管理工作提供方法借鉴。

## 1 研究方法

本文构建了基于粒子群算法和渐进覆盖模型的开放性公共场所疏散引导人空间布局优化方法。2种方法结合运用,将更加符合疏散引导的实际情况,提升引导人空间布局合理性和疏散引导效率。

已有研究大多将疏散人员活动空间定义在道路网络上,并根据道路网络节点风险值进行疏散引导人的布局<sup>[25-26]</sup>。由于开放性公共场所结构的特殊性,本文将疏散人员活动空间定义在更加微观的面状空间上,来开展疏散引导人空间布局优化方法的研究。在进行疏散引导人布局时需要明确疏散引导人的数量、引导对象、引导位置、引导人的空间覆盖范围等信息,同时还要考虑障碍物的阻碍作用。这要求达到引导效益最大化(总服务质量最大化)、引导成本最小化(引导人数量最小化)、每个疏散人员都能得到引导且得到的最小引导质量最大化等多重目标。因此,根据疏散人员分布的特性,结合粒子群优化算法和渐进覆盖模型,本文提出一种开放性公共场所疏散引导人空间布局优化方法。该方法假设:①疏散人员只能在疏散引导人的引导下,离开疏散空间;②疏散引导人在收到疏散预警信息后,明确了解其引导范围和疏散空间的全部信息,并有能力进行疏散人员的疏散引导;③疏散引导人的引导受其可引导疏散人员数量阈值和引导范围的限制,且疏散引导人离开引导空间后不再返回。具体参数设置如下:

### (1) 决策变量

$$Z_j = \begin{cases} 0, & j \text{ 被选为引导人} \\ 1, & j \text{ 不被选为引导人} \end{cases} \quad (1)$$

$$L_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{疏散人员 } i \text{ 被引导人 } j \text{ 引导} \\ 1, & \text{疏散人员 } i \text{ 不被引导人 } j \text{ 引导} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{疏散人员 } i \text{ 与引导人 } j \text{ 之间不可通视} \\ 1, & \text{疏散人员 } i \text{ 与引导人 } j \text{ 之间可通视} \end{cases} \quad (3)$$

## (2) 目标函数

$$\max \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f(d_{ij}) S_{ij} L_{ij}}{n \times \sum_{j=1}^m Z_j} \quad (4)$$

$$\max Q \quad (5)$$

## (3) 约束条件

$$\sum_{j=1}^m L_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n L_{ij} \leq K, \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^m f(d_{ij}) L_{ij} \geq Q, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (8)$$

式中:  $Q$  表示个体获得的最小引导质量,  $n$  表示疏散人员总数量,  $I$  表示疏散人员集合,  $m$  表示引导人总数量,  $J$  表示引导人集合,  $i$  表示序号为  $i$  的疏散人员,  $j$  表示序号为  $j$  的疏散引导人员,  $K$  表示每个引导人可引导人员数量阈值,  $d_{ij}$  表示引导人  $j$  与疏散人员  $i$  之间的距离,  $f(d_{ij})$  表示引导人  $j$  给疏散人员  $i$  提供的引导质量,  $Z_j$  表示  $j$  是否被选为引导人,  $L_{ij}$  表示疏散人员  $i$  和引导人  $j$  是否建立引导关系,  $S_{ij}$  表示疏散人员  $i$  和引导人  $j$  之间是否可以通视。式(1)~(3)表示决策变量的取值范围, 式(4)表示引导效益最大化、引导成本最小化且考虑障碍物因素, 式(5)表示最小引导质量最大化, 式(6)表示所有疏散人员都能得到引导, 式(7)表示每个引导人引导疏散人员数量不超过阈值  $K$ , 式(8)表示每个疏散人员获得的引导质量不小于最小引导质量  $Q$ 。

## 1.1 粒子群算法

粒子群算法是一种常用的优化选址算法, 在相关的研究中已证实了该方法具有良好的搜索效率和实用性<sup>[27]</sup>。本文选用粒子群算法来确定疏散引导人的空间优化布局。粒子群算法模拟鸟群觅食情景, 通过多次迭代比较的方式找寻最优解。首先在可行解空间中初始化一群具有一定速度、位置、适应度值等属性的疏散引导人可行解来代表优化问题的潜在解集合, 经过比较可行解的适应度值, 找出疏散引导人可行解的个体极值和群体极值。在每一次迭代中, 更新疏散引导人可行解的个体极值与群体极值, 并根据极值来更新引导人可行解的速度和位置, 更新公式如下:

$$V_{id}^{k+1} = w \times V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{kd}^k - X_{id}^k) \quad (9)$$

$$w = w_1 - n \times \frac{w_1 - w_2}{m} \quad (10)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (11)$$

式中:  $V_{id}^k$ 、 $V_{id}^{k+1}$  分别表示引导人可行解  $i$  在  $k$  和  $k+1$  次迭代中第  $d$  维的速度值;  $w$  为非负值的惯性因子, 代表引导人可行解继承上一次迭代速度的能力,  $w$  值的大小影响全局寻优能力和局部寻优能力, 为平衡全局与局部寻优性能, 特引入权重线性递减函数式(10), 其中  $w_1$  表示  $w$  的最大值,  $w_2$  表示  $w$  的最小值,  $m$  表示最大迭代次数,  $n$  表示当前迭代次数;  $P_{id}^k$  与  $P_{kd}^k$  分别表示  $k$  次迭代中疏散引导人可行解  $i$  当前个体极值和该次迭代的群体极值的第  $d$  维; 分别引入个体学习因子  $c_1$ 、社会学习因子  $c_2$ , 以及在  $[0, 1]$  区间上的随机数  $r_1$ 、 $r_2$ , 结合当前引导人可行解第  $d$  维的位置  $X_{id}^k$ , 用  $(P_{id}^k - X_{id}^k)$  来代表当前疏散引导人可行解  $i$  与其个体极值在第  $d$  维的差距。结合已有学者的研究经验<sup>[28]</sup>, 本文中  $w_1$  取值为 0.9,  $w_2$  取值为 0.4,  $c_1$  与  $c_2$  取值为 1.49。

## 1.2 渐进覆盖选址模型

在使用粒子群算法求解疏散引导人空间布局的过程中, 必须要选择合适的模型来确定疏散引导人的引导覆盖范围。在相关研究领域, 多使用覆盖模型来确定。传统的覆盖模型设置了严格的覆盖标准, 即指定引导覆盖范围内的疏散人员可以得到 100% 的引导服务, 范围以外的疏散人员则不被提供引导服务, 这种严格的二分法与实际情况有所不同。Church 等<sup>[29]</sup>提出了渐进覆盖模型的概念, 随着研究的深入逐渐形成了分段式覆盖模型、线性渐进覆盖模型、基于非凸非凹函数的覆盖模型<sup>[30-31]</sup>。分段式覆盖模型不适用于描述研究对象的连续性变化特征; 线性渐进覆盖模型虽然考虑到了现实对象的连续性特征, 但线性递减的变化难以表达现实中复杂的研究情景; 非凸非凹函数的覆盖模型则既考虑了研究对象的连续变化特征, 又考虑了现实情景的复杂性, 能够较好地模拟现实情况中距离与服务覆盖水平之间的关系。因此, 本文采用基于非凸非凹函数的覆盖模型来研究引导人的引导覆盖范围问题。具体函数如下:

$$f(d_{ij}) = \begin{cases} 1, & 0 \leq d_{ij} \leq d_1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left[ \frac{\pi}{d_1 - d_2} \left( d_{ij} - \frac{d_1 + d_2}{2} \right) + \frac{\pi}{2} \right], & d_1 < d_{ij} \leq d_2 \\ 0, & d_{ij} > d_2 \end{cases} \quad (12)$$



式中:  $f(d_{ij})$  表示引导人  $j$  给疏散人员  $i$  提供的引导质量,  $d_1$  表示最佳覆盖范围,  $d_2$  表示最大覆盖范围。如果  $i$ 、 $j$  之间的距离在  $d_1$  之内, 则疏散人员  $i$  可以得到 100% 的引导; 当  $i$ 、 $j$  之间的距离大于  $d_2$  时, 则引导人  $j$  不为疏散人员  $i$  提供引导服务。

已有学者的研究发现, 正常人可识别景物的视距为 150~270 m<sup>[32]</sup>, 考虑开放性公共场所人流对通视性的影响以及疏散引导的有效距离, 本文将疏散引导人引导覆盖范围设置为:  $d_1=100$  m,  $d_2=200$  m; 基于 Matlab 语言进行编程设计, 经过多次实验, 最终设定粒子群算法的引导人种群规模为 100, 迭代次数为 50 次, 并设置每位引导人最多引导的疏散人员数量  $k=100$ 。

### 1.3 应急疏散智能体模型

智能体是一种能够描述自身与环境变化的实体, 可以模拟人和其他实体感知外部信息并与其他智能体进行信息共享、采取相应行动的行为。智能体模型具有自主性、交互性、反应性和主动性的特点。本文使用应急疏散智能体模型分别模拟引导人优化布局和人为布局情景下的应急疏散过程, 以评价开放性公共场所疏散引导人空间布局方法的有效性和实用性。

本文基于 Unity 平台构建应急疏散智能体模型, 通过 Unity 平台中的 ProBuilder 插件实现疏散场景的构建, 基于 Unity 提供的组件实现智能体的创建及其属性的设置, 并通过脚本编程为智能体对象设定疏散行为。Unity 中的导航组件可以实现智能体疏散时的寻路功能, 在疏散过程中, 该导航组件可以根据疏散场景生成导航网格。在拐角点算法与 A-star 算法的支持下, 通过为疏散引导人与疏散人员智能体绑定导航组件, 实现疏散路径的规划, 模拟智能体的疏散过程。要开展疏散模拟, 需要预先构建开放性公共场所疏散场景、疏散人员智能体和疏散引导人智能体相关属性和行为。

(1) 开放性公共场所疏散场景: 开放性公共场所三维模型的构建是人群疏散的重要基础, 高真实性的场景有利于疏散过程模拟。本文主要对建筑物、草坪与树丛进行建模。在疏散场景的三维模型中, 设置导航网格作为场景内人员的运动空间。

(2) 疏散引导人智能体属性: 疏散引导人在应急疏散过程中起重要作用, 在收到疏散预警时, 引导人负责引导公共场所内人群有序撤离。本文构

建的疏散引导人智能体的属性包括初始位置、初始速度、最大速度、当前位置、当前速度、移动方向、质量、高度、肩宽、移动目标、移动路径等。当疏散引导人的速度为疏散人员的 75% 时<sup>[12]</sup>, 具有较好的疏散效果, 故本文中疏散引导人智能体的最大速度设置为疏散人员智能体最大速度的 75%。疏散引导人智能体的相关属性如表 1 所示。

(3) 疏散人员智能体属性: 疏散人员在疏散过程中的行为具有复杂性、动态性与不确定性。本文以疏散人员为中心, 一定半径范围作为该疏散人员的周围环境(环境可视半径内), 并认为疏散人员的行为与其周围的环境密切相关。疏散人员在疏散过程中不知晓疏散场景和疏散情况, 且具有一致的属性与疏散行为。疏散人员智能体的属性包括初始位置、初始速度、最大速度、当前位置、当前速度、移动方向、质量、高度、肩宽、移动目标、移动路径、环境可视半径、所跟随的疏散引导人的位置等, 部分属性值在疏散模拟过程中发生改变。疏散人员智能体的相关属性如表 2 所示。

(4) 智能体的一系列行为包括:

① 当疏散人员周围环境中不存在疏散出口, 但存在引导人时, 疏散人员会选择距离最近的引导人进行跟随; 当周围环境中存在疏散出口时, 疏散人员会优先选取最近的疏散出口完成疏散; 当疏散人员周围没有疏散出口和引导人时, 疏散人员智能体的运动方向趋向于周围人群的整体运动方向。

② 在疏散开始时和疏散过程中, 疏散引导人智能体需要在公共场所的多个疏散出口中, 综合考虑离出口距离、出口处疏散人员数量因素, 选择当前最优的疏散出口作为移动目标。

③ 在疏散引导过程中, 为了避开障碍物, 引导人和疏散人员智能体的移动方向会发生改变。

④ 在疏散过程中, 智能体(疏散人员和疏散引导人)的移动速度与周围的人群密度相关, 当智能体周围(可视范围内)的人群密度增加时, 智能体将会降低移动速度。根据相关通行速度与人流密度的关系模型<sup>[33]</sup>, 降低后的移动速度  $Speed_r$  的计算公式如下:

$$Speed_r = \begin{cases} Speed_{max}, & \rho \leq 0.75 \\ 0.0412\rho^2 - 0.59\rho + 1.867, & 0.75 < \rho \leq 4.2 \\ 0.1, & \rho > 4.2 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $Speed_r$  是智能体当前的移动速度(m/s),



表1 疏散引导人智能体相关属性

Tab.1 Attributes of the evacuation leader agent

属性	值/描述
初始速度(m/s)	0.975
最大速度(m/s)	1.05
当前速度(m/s)	疏散过程中引导人移动速度,根据式(13)确定
肩宽(m)	0.6
质量(kg)	70
高度(m)	1.7
环境可视半径(m)	100
初始位置	疏散前,所设定的引导人位置
当前位置	疏散过程中,产生引导人的实时位置
移动方向	引导人当前位置指向移动目标的方向;移动过程中为绕开障碍物,会适当调整移动方向
移动目标	综合考虑离出口距离、出口处疏散人员数量因素,选择当前最优的疏散出口作为移动目标
移动路径	通过 A-star 算法计算获得的路径

表2 疏散人员智能体相关属性

Tab.2 Attributes of the evacuee agent

属性	值/描述
初始速度(m/s)	1.3
最大速度(m/s)	1.4
当前速度(m/s)	疏散过程中疏散人员移动速度,根据式(13)确定
肩宽(m)	0.6
质量(kg)	70
高度(m)	1.7
环境可视半径(m)	80
初始位置	疏散模拟前,疏散人员的空间位置
当前位置	疏散过程中,疏散人员的实时位置
移动方向	总体指向移动目标;移动过程中为绕开障碍物,会适当调整移动方向
移动路径	通过 A-star 算法计算获得的路径
移动目标	根据可视半径范围内的情况确定
所跟随引导人位置	在可视范围内,选择距离最近的引导人,获得其位置并跟随

$Speed_{max}$  是智能体最大移动速度(m/s);  $\rho$  是智能体周围环境内的人群密度(人/m<sup>2</sup>)。通过计算,可以根据人群密度确定当前智能体的移动速度。

⑤ 智能体移动路径:本文选用基于网格的 A-star 算法作为智能体的寻路算法。将复杂的现实场景抽象为网格,并在网格化后的现实场景中结合拐角点算法完成智能体路径的规划<sup>[34-35]</sup>。

1.4 疏散引导人责任区动态规划方法

疏散引导人的数量和空间位置需根据开放性公共场所的人群密度和拥挤度来布设,但由于公共场所内人群密度具有很高的实时性和动态性,难于根据实时的人群分布状态来重新布局引导人。因

此,可以根据一定时段内人群密度的情况,为疏散引导人划分责任区,以满足开放型公共场所日常安全防范的需求。一般来说,人群密度和拥挤程度越高的区域更易发生安全事故,需优先考虑布设充足的疏散引导人。本文根据学者提出的公园内人的拥挤感受及使用密度指标<sup>[36]</sup>,结合方家等<sup>[37]</sup>以 122 人/hm<sup>2</sup>作为上海市顾村公园不拥挤到拥挤感受的阈值标准,制定了开放性公共场所拥挤程度划分标准(表3)。根据该标准,可以将一天内所有时刻划分为不同时间段。根据各时刻疏散引导人空间布局优化结果,以时间段为单位进行开放性公共场所疏散引导人的责任区动态规划。具体优化流程如下:

表3 开放性公共场所拥挤程度划分标准

Tab.3 Crowdedness classification standard of open public places

拥挤程度	有很大空间 (I)	有较大空间 (II)	不拥挤到拥挤 (III)
单位面积使用人数/(人/hm <sup>2</sup> )	0~40	41~122	>122

## (1) 各时间段疏散引导人数量的确定

$$L = \begin{cases} \min(L_i, L_{i+1}, \dots, L_j), & \text{拥挤程度为I} \\ \frac{L_i + L_{i+1} + \dots + L_j}{j-i}, & \text{拥挤程度为II} \\ \max(L_i, L_{i+1}, \dots, L_j), & \text{拥挤程度为III} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $L$  表示时间段疏散引导人的数量。拥挤程度为I时, 取时刻  $i$  到时刻  $j$  时间段内疏散引导人数量最少时刻的疏散引导人数量, 作为该时间段的疏散引导人数量; 拥挤程度为II时, 取时刻  $i$  到时刻  $j$  时间段内疏散引导人数量平均值, 作为该时间段的疏散引导人数量; 拥挤程度为III时, 取时刻  $i$  到时刻  $j$  时间段内疏散引导人数量最大值, 作为该时间段的疏散引导人数量。

## (2) 各时间段责任区中心位置的确定

① 提取时间段内疏散引导人数量大于  $L$  的时刻, 使用聚类分组方法将该时刻的疏散引导人聚类为  $L$  类, 通过最小边界几何法找出每一类的中心点位, 代表聚类分组后该时刻疏散引导人的位置, 确保每个时刻的疏散引导人数量都小于等于  $L$ 。

② 按照时间顺序, 遵循最短移动距离原则, 得到每个时间段内每位疏散引导人的最短移动路线, 通过最小边界几何法得到每位疏散引导人移动路径的中心点位, 代表该时间段内各疏散引导人的责任区中心位置。

## (3) 引导人责任区划分

根据前两步确定的各时间段引导人数量及引导人责任区中心位置, 使用泰森多边形模型, 结合开放性公共场所的实际空间格局进行责任区的划分。

## 2 研究区域与数据处理

## 2.1 研究区域

上海市徐汇区滨江绿地空间东部濒临黄浦江, 全天开放供公众免费使用, 没有固定的出入口, 属于典型的开放性公共场所。本文选择绿地空间内人流量最大的主要区域作为研究区(图1), 总面积约为9.4 km<sup>2</sup>。区域内包括龙美术馆、攀岩区、滨江滑板公园等众多人群集聚场所, 同时区域内设置有大

片可供野餐的草坪和篮球场地, 为人群的集聚提供了条件。通过调研了解到该区域在疫情期间的节假日内, 其人流量最高的时刻仍可超过2000人次。可推测在普通时期, 该区域人流量将大于该数字。在安全管理方面, 该区域平时安排的疏散引导人(安保人员)数量较少, 在人流高峰期该区域引导服务存在供不应求的问题。因此, 针对该区域合理安排与调度疏散引导人, 开展应急疏散引导人空间优化布局研究, 具有一定代表性。通过合理有效的疏散引导人空间布局策略, 可以提高开放性公共场所应急疏散的安全性和效率, 为开放性公共场所的突发事件应急管理提供技术上的支持和决策依据。

## 2.2 数据处理

通过实地调研发现, 研究区节假日的人流量较大, 而不同节假日同一时刻的人流量变化幅度相对较小, 基本保持在300人以内, 且研究区内人群的大致流动方向和聚集区域基本相同, 选择某个节假日进行研究具有一定的代表性。故本文以调研获得的2021年5月5日(五一节假日期间)8:00~19:00(30 min为时间间隔)共23个时刻的研究区内部人群分布数据为例, 开展案例研究。通过人工解译的方法对各个时刻拍摄的照片、视频等多媒体数据中的人员信息进行提取, 处理得到研究区内部人群的空间位置信息, 并以Shapefile文件格式进行存储。研究区内不同时刻人群数量变化情况见下文分析。

## 3 疏散引导人优化布局结果与疏散效率评价

## 3.1 疏散引导人布局优化及疏散过程

将研究区23个时刻的疏散人员空间数据代入本文所提出的开放性公共场所疏散引导人空间布局方法中, 可得到相对应的各时刻疏散引导人空间分布情况。以2021年5月5日9:30为例, 通过引导人布局优化后共生成了10位疏散引导人的空间布局。为说明本文疏散引导的机制, 以6号和7号引导人引导区域为例(图2)进行阐述。考虑到引导人引导空间覆盖范围及引导质量的距离衰减效应, 疏

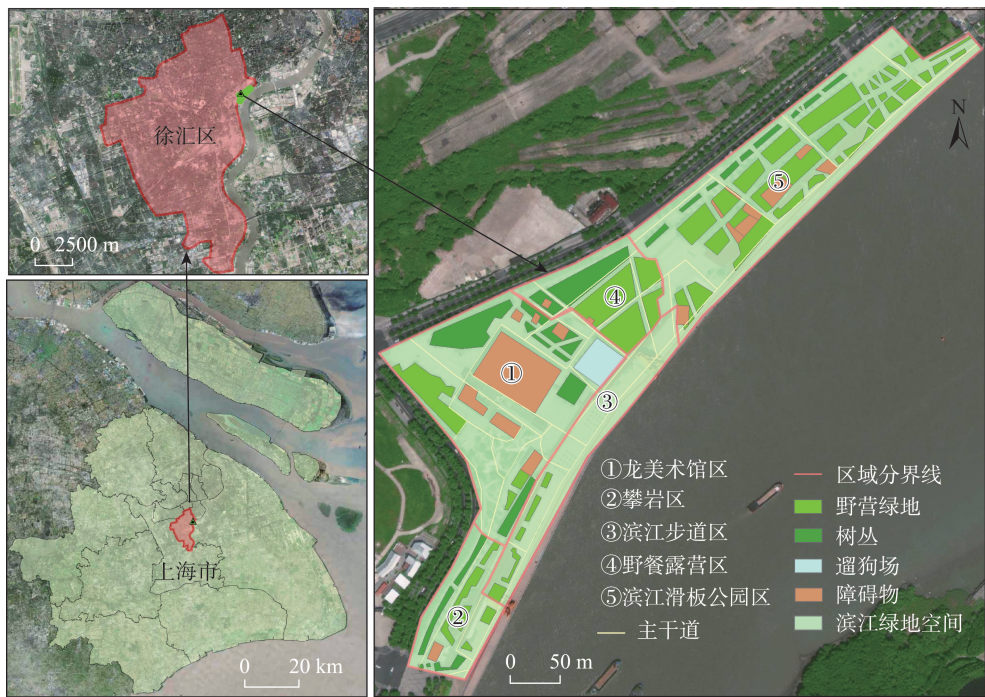
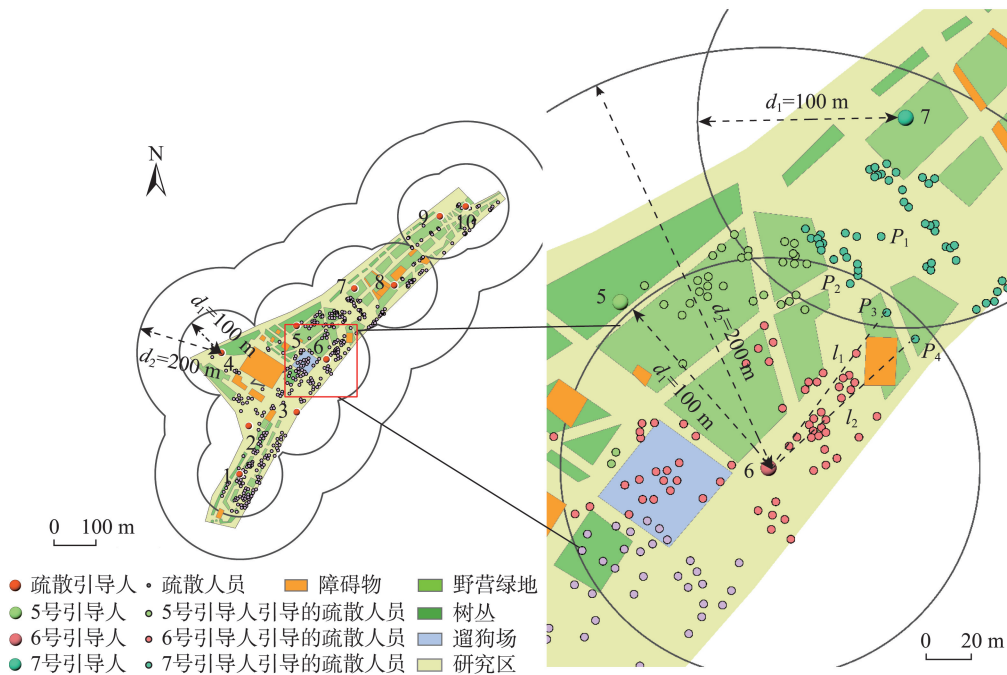


图1 上海市徐汇区滨江绿地开放性公共空间

Fig.1 The study area in Binjiang Green Space, Xuhui District, Shanghai Municipality



注:图中1~10为引导人编号, $P_1\sim P_5$ 为疏散人员, $l_1$ 、 $l_2$ 为障碍物。

图2 2021年5月5日9:30疏散引导人空间布局示意图

Fig.2 Diagram of the allocation of the evacuation leaders at 9:30 on 5 May 2021

散人员 $P_1$ 位于6号引导人 $d_1\sim d_2$ (100~200 m)引导范围和7号引导人 $d_1$ 引导范围内,获得的引导质量 $y$ ( $0\leq y\leq 1$ )分别为0.83和1,因此,疏散人员 $P_1$ 选择提供引导质量较高的7号引导人进行跟随。部分疏散

人员,如 $P_2$ 位于6号和7号引导人 $d_1$ 引导范围的相交区域,则 $P_2$ 会选择现阶段引导疏散人员较少的引导人(7号)进行跟随。疏散人员 $P_3$ 和 $P_4$ 位于6号引导人的 $d_1$ 引导范围内,但他们与6号引导人之间的



通视性受到障碍物的阻挡( $l_1$ 、 $l_2$ ),6号引导人可为 $P_3$ 和 $P_4$ 提供的引导质量 $y=0$ ,同时 $P_3$ 、 $P_4$ 分别处于7号引导人 $d_1$ 和 $d_1 \sim d_2$ 引导范围内,所得到的引导质量分别为1和0.94,两者最终获得7号引导人的引导。

在疏散模拟过程中,疏散人员的空间分布会随时间发生动态变化。基于疏散规则,疏散人员将全部从疏散出口撤离,完成疏散。为了探讨疏散过程中,疏散人员的动态变化情况及其空间分布相关性,将研究区划分成 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的格网。以14:30为例,以20 s为时间间隔,获取疏散过程中疏散人员空间分布数据,并得到对应每个时间点的基于格网的疏散人员密度和每个网格离最近出口的距离。通过地理探测器,探测“网格离最近出口距离”对“疏散人员密度”空间分异的解释力,用空间分异性 $q$ 统计值( $q \in [0, 1]$ )表示<sup>[38]</sup>。基于ArcGIS求取疏散过程中不同时间点的疏散人员密度莫兰指数(Moran's  $I$ )<sup>[39]</sup>,其中 $P$ 值均小于0.01,由图3可知,研究区各网格中疏散人员密度在整个疏散过程中都呈现较强的空间自相关,这说明疏散人员密度具有较显著的空间集聚特征。同时,伴随着疏散过程的推进,研究区内疏散人员密度的空间自相关特征整体上呈现减弱的趋势。疏散人员密度莫兰指数在疏散过程中的变化可以说明,引导人可以有效减缓疏散人员的聚集,并有序引导其疏散至出口。空间分异性 $q$ 统计值随着疏散时间的推移呈现先增大后减小的趋势,说明随着疏散过程的进行,网格与最近出口之间的距离对网格内疏散人员密度的空间分异性的解释力先增强后减弱。在疏散过程前期,疏散人员受到引导人的引导作用,不断向疏散出口方向聚集,表现出离疏散出口越近的网格其疏散人员密度越大的趋势。在疏散过程的中后期,由于大部分疏散人员逐渐撤离出公共场所,网格离最近出口

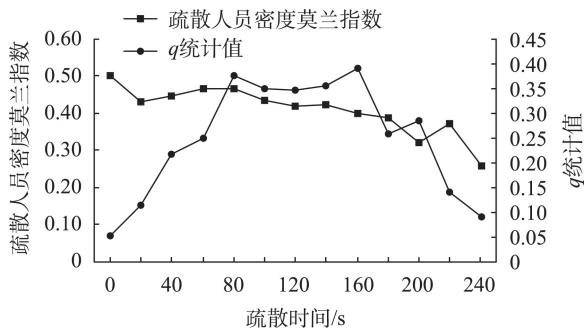


图3 疏散过程中 $q$ 统计值和疏散人员密度莫兰指数变化曲线

Fig.3 Change of  $q$ -statistic value and evacuee density Moran's  $I$  in the evacuation process

距离对疏散人口密度的影响随之减弱。

### 3.2 各时刻疏散引导人空间布局

对研究区23个时刻的疏散引导人空间布局结果进行分析,结果表明:

在数量上,疏散引导人与疏散人员之间基本呈现正相关,即疏散人员越多的时刻,其所需疏散引导人数量越多(图4)。除个别时刻外,8:00~16:00疏散引导人数量和疏散人员数量基本保持持续增加。8:00~9:30疏散引导人数量变化幅度较小,这是因为该时间段研究区内疏散人员多为附近晨练的居民,外来游客数量较少。14:30~16:00疏散引导人数量和疏散人员数量大幅增加,这与该开放性公共场所可为游客提供大量午后野营休憩空间有关。在16:30之后,该开放性公共场所疏散引导人数量与疏散人员数量持续减少,但仍多于8:00~9:30。

在空间上,某时刻疏散引导人空间布局与该时刻的疏散人员空间分布也存在很大的关联性,疏散引导人大多布局在疏散人员密集的区域。以17:00为例,该开放性公共场所共需26位疏散引导人(图4),其中约4/5的疏散引导人分布在人群集聚的区域。同时,攀岩区和龙美术馆区中间的遛狗场附近、滑板公园区的西南部(滑板广场)及其与野营绿地区交界处人群呈现高度聚集特征。与之对应,该时刻约有1/2的疏散引导人分布在这些人群高度聚集区域内部及其周围。

由于障碍物的阻挡及人群聚集特征,部分相邻时刻存在疏散人员数量增多、疏散引导人数量减少的情况。如13:30的疏散人员数量少于14:00,但其所需疏散引导人数量多于14:00。这是由于相较13:30,14:00疏散人员分布更为聚集,同时,在人

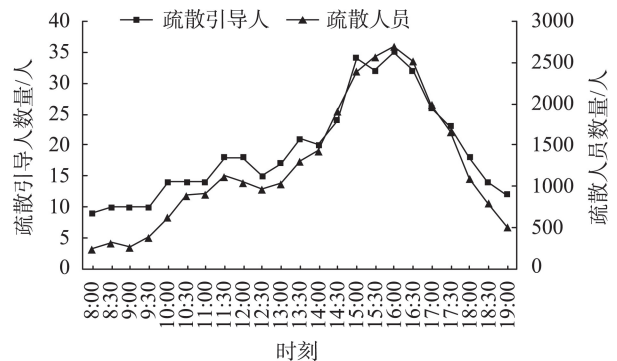


图4 2021年5月5日不同时刻疏散人员与疏散引导人数量变化情况

Fig.4 Changes in the number of evacuees and evacuation leaders at different moments on 5 May 2021

群集聚区域,如龙美术馆区的东北和西南方向存在着许多不可通视的障碍物。在13:30有更多的疏散人员分布于该区域的障碍物之间(图5),这些障碍物的存在会影响到疏散引导人与疏散人员之间的可通视性,进而影响引导效率,增加引导成本。

### 3.3 疏散效率评价

通过本文提出的开放性公共场所疏散引导人空间布局方法的实际应用,可以得出研究区不同时刻疏散引导人布局结果。为验证该方法的有效性,本文在应急疏散智能体模型的支持下,选择一个时刻,对比“疏散引导人人为布局”(简称“人为布局”)和“疏散引导人优化布局”(简称“优化布局”)后的应急疏散效率。“人为布局”是指根据公共场所安全管理的常识将疏散引导人布设在主要疏散出口附近及人群聚集区域<sup>[30]</sup>。

以14:30为例,该时刻研究区内共有1914位疏散人员,优化后共需24位疏散引导人。为验证“优化布局”下,引导人空间位置、数量优化结果的合理性,分别设定了引导人数量为22、23、24、25、26人的“人为布局”与“优化布局”情景(图6),并在不同情景下模拟疏散过程,对疏散效率进行对比评价。每次模拟前根据表1、表2设定疏散人员和引导人的属性,并根据前文所设定的智能体疏散行为进行疏散模拟。结果如表4所示,表中以5 min作为可用疏散时间(ASET),记录不同情景下疏散人员安全撤离所消耗的时间。剩余疏散人员数量是指超过 ASET 的

时限下,未被疏散的疏散人员数量<sup>[13]</sup>。

从疏散引导人数量上看,当引导人数量为24人时,对应“优化布局”情景下的疏散效率最高。在“人为布局”情景下,随着引导人数量的增加,疏散效率得到逐步的提升,但其疏散效率仍要低于对应的“优化布局”情景。在“优化布局”情景下,引导人数量少于23人时,在ASET内无法完成所有疏散人员的疏散。引导人数量多于24人时,总体疏散时间的变化幅度较小,表明引导人数量的增加不能进一步提升疏散效率,反而增加引导成本。可见本文提出的方法可以有效地确定引导人配置的最优数量和布局(表4)。

引导人数量相同的情况下,疏散引导人优化布局后的疏散效率要明显优于人为布局的疏散效率(表4)。以引导人数量为24人为例(图7),从疏散时间上来看,对应“优化布局”情景下,该时刻所有的疏散人员疏散完成共需要255 s,而“人为布局”情景下,则需要315 s。疏散引导人优化布局后,可节约60 s的疏散时间,有效地降低了应急疏散的时间成本。从场所剩余疏散人员数量来看,在疏散过程中期(80~120 s),“人为布局”和“优化布局”2种情景下的剩余疏散人员数量相近,而在疏散过程前期(0~80 s)和后期(120~315 s),“人为布局”情景下的剩余疏散人员数量要多于“优化布局”情景。这反映了疏散引导人优化布局可以有效提高应急疏散的效率,确保尽可能多的疏散人员得到有效的引导。

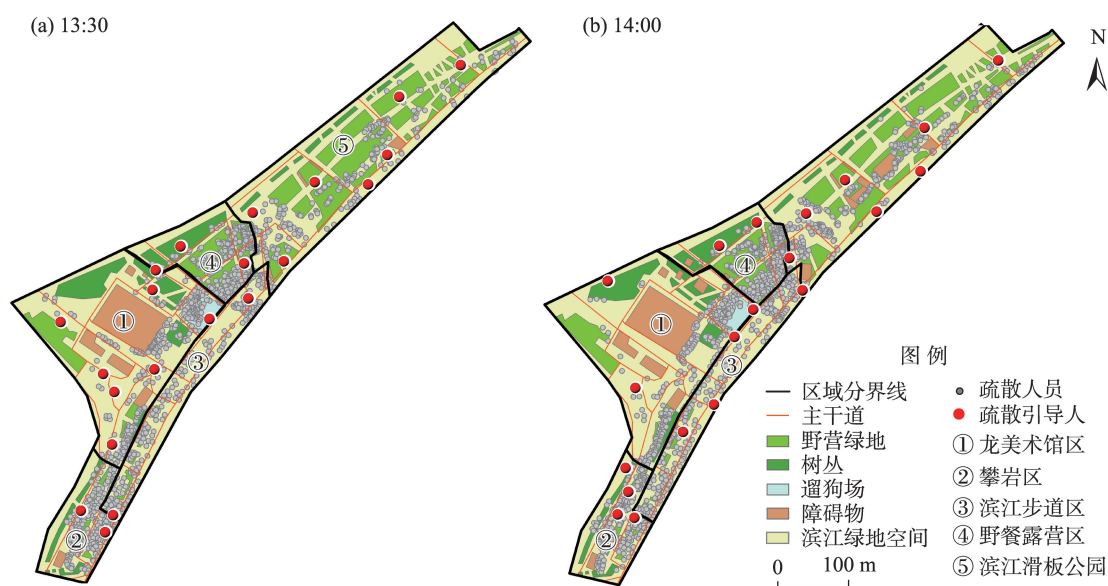


图5 2021年5月5日13:30和14:00疏散引导人与疏散人员空间布局

Fig.5 Spatial allocation of evacuation leaders and evacuees at 13:30 and 14:00 on 5 May 2021

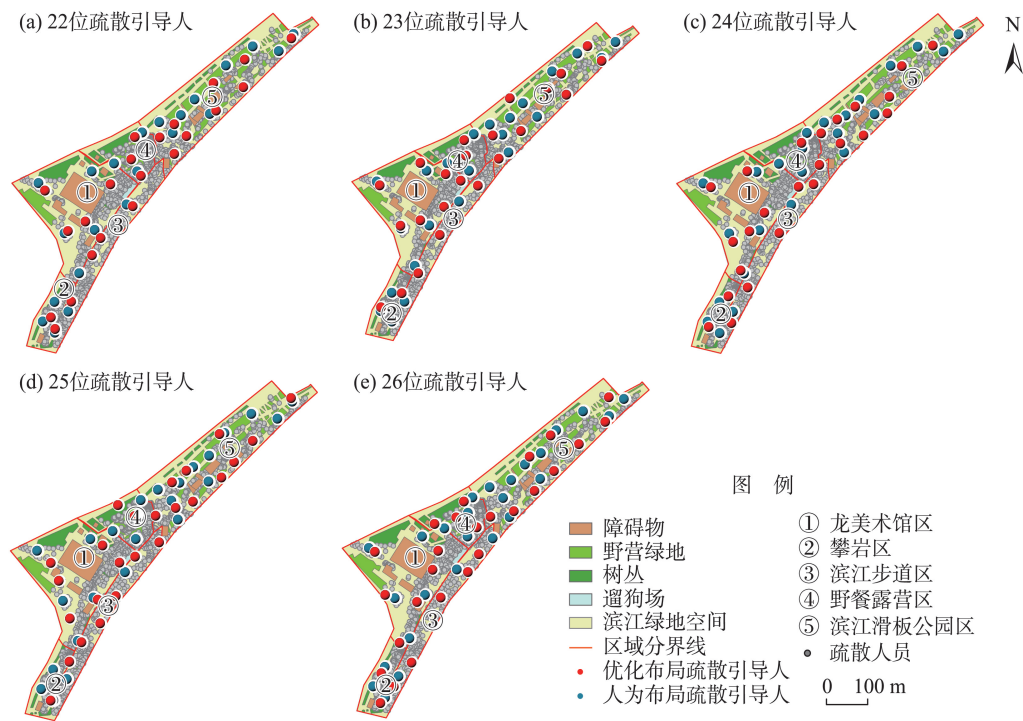


图6 2021年5月5日14:30不同情景下疏散引导人与疏散人员空间布局

Fig.6 Optimized and artificial allocation of evacuation leaders at 14:30 on 5 May 2021

表4 2021年5月5日14:30引导人不同布局情景的疏散效率比较

引导人布局方式	引导人数:22人		引导人数:23人		引导人数:24人		引导人数:25人		引导人数:26人	
	人为布局	优化布局	人为布局	优化布局	人为布局	优化布局	人为布局	人为布局	人为布局	优化布局
疏散时间/s	300	300	300	280	315	255	300	260	295	260
剩余疏散人员数量/人	18	5	9	0	7	0	4	0	0	0

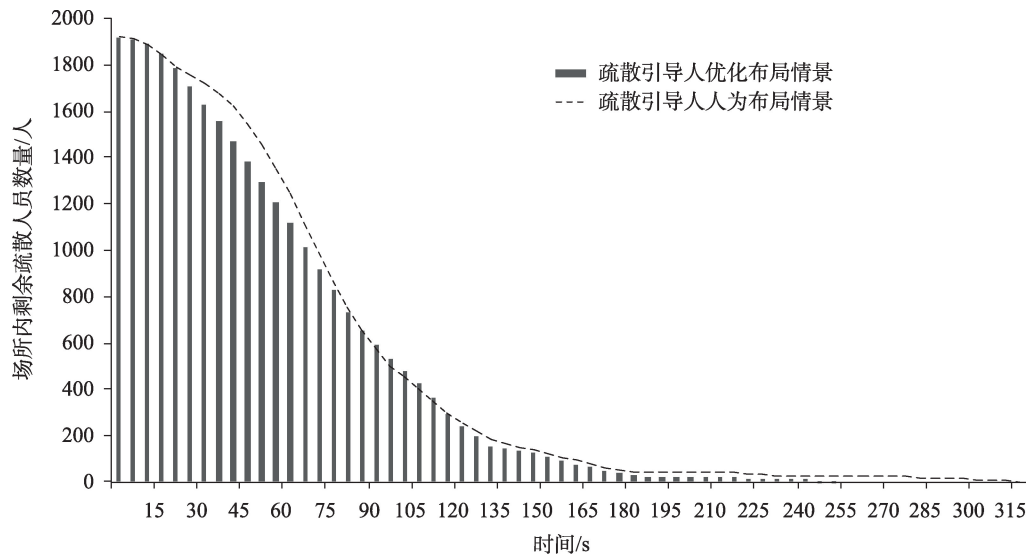


图7 不同情景下应急疏散效率对比(引导人数量为24人)

Fig.7 Comparison of evacuation efficiency between optimized and artificial allocation of evacuation leaders at 14:30 on 5 May 2021 (the number of leaders is 24)



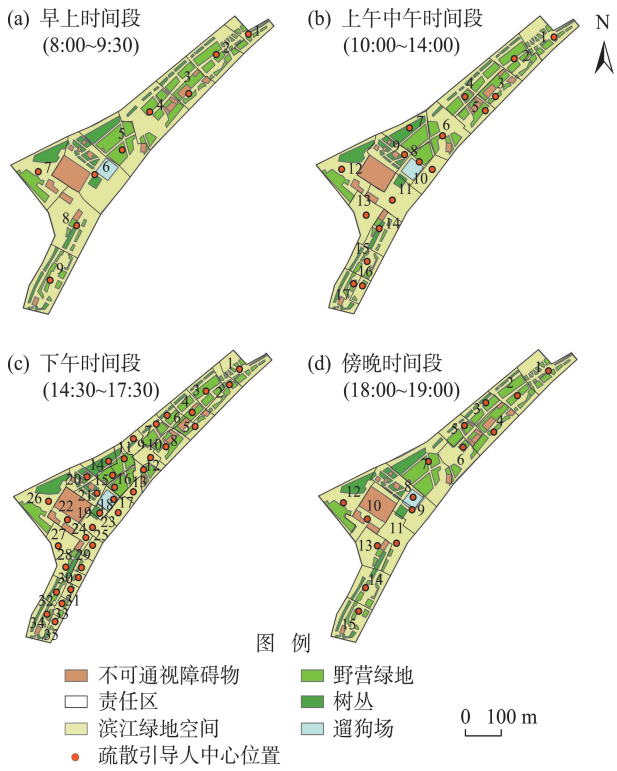
4 各时间段疏散引导人责任区动态规划

根据研究区不同时刻的人群分布情况,能够生成各个时刻的疏散引导人空间布局。但是现实情况下,难于在公共场所的日常安全管理中按照间隔较短的不同时刻分别进行疏散引导人的布局。故本文以各个时刻的疏散引导人空间布局为基础,考虑各时刻的人群拥挤程度及时刻之间的连续性,将23个时刻划分为4个时间段。结合本文提出的疏散引导人责任区动态规划方法,可得到各个时间段的疏散引导人需求情况(表5)及责任区动态划分结果(图8)。通过对该结果的分析可知:

不同时间段所需引导人数量与该时间段内疏散人员数量有关。随着时间的推移,从早上时间段(8:00~9:30)到下午时间段(14:30~17:30)所需疏散引导人数量持续增加,在傍晚时间段(18:00~19:00)所需疏散引导人数量大量减少,约为下午时间段疏散引导人数量的1/2,与上午中午时间段(10:00~14:00)的引导人数量相近,但其数量仍多于早上时间段。与之对应,傍晚时间段与上午中午时间段的疏散人员数量相近,且远大于早上时间段,下午时间段的疏散人员数量最多,约为傍晚时间段的2~3倍。而研究区实际布局的疏散引导人数量只能满足早上时间段的应急疏散需求,故研究区需要适当增加疏散引导人的数量。

早上时间段责任区块较少,引导人责任区基本按照西北—东南方向进行划分,除滨江滑板公园区的1、2、3号责任区外,各个责任区面积差异较小。这是由于早上时间段疏散人员数量较少,且多分布在研究区东北部(1、2、3号责任区),因此,在早上时间段可重点关注东北部的安全防范;上午中午时间段,随着疏散人员数量的增加,责任区数量也随之增多,并出现了按东北—西南方向划分的责任分区。增加的责任区集中分布在野营绿地多的区域,这与该时间段疏散人员多进行野餐露营活动有关,该时间段需重点防范野营绿地区域的安全风险。

不同区域责任区的数量与该区域对应时间段疏散引导人数量占比高度相关。下午时间段疏散人员数量最多,整个区域被划分为35个责任区,相较于其他时间段,该时间段的责任区划分更为精细,其中滨江步道区、野餐露营区虽然只占到研究区总面积的21%左右,但责任区数量占比达37%,这与该时间段两区域疏散人员数量占比达35%左右相对应。可见,滨江步道区、野餐露营区在下午时间段容易出现人群的集聚,更需要设定合理有效的安全防范措施。傍晚时间段,由于疏散人员的大幅度减少,责任区数量减为15个,其中7号责任区面积最大,这与该时间段野餐露营区疏散人员大量减少有关。从下午时间段到傍晚时间段,由于相邻时间段疏散人员数量的成倍减少,相应不同时间段



注:图中数字表示责任区编号。  
图8 各时间段疏散引导人责任区划分情况  
Fig.8 Division of evacuation leaders' responsibility areas in several time periods

表5 2021年5月5日各时间段疏散引导人需求情况				
Tab.5 Demand of evacuation leaders at different time periods in Binjiang Green Space on 5 May 2021				
时间段	早上时间段(8:00~9:30)	上午中午时间段(10:00~14:00)	下午时间段(14:30~17:30)	傍晚时间段(18:00~19:00)
拥挤程度	I	II	III	II
所需疏散引导人数量/人	9	17	35	15

责任区的设置有显著变化。鉴于此,研究区需要根据不同的时间段调整疏散引导人的数量及其空间分布。

## 5 结论与讨论

(1) 本文基于粒子群算法和渐进覆盖模型提出了一种开放性公共场所疏散引导人优化布局方法。该方法考虑到引导人空间覆盖范围及引导质量距离衰减效应、可引导人员数量阈值、障碍物对通视性的影响等多种影响要素,以最小引导质量最大化、引导成本最小化、引导效益最大化为目标,确定开放性公共场所不同时刻的疏散引导人空间布局及引导关系。同时,基于应急疏散智能体模型模拟了疏散引导人人为布局情景和优化布局情景下的疏散过程,通过疏散效率的对比,证实了该方法的有效性和可靠性。根据不同时间段人群拥挤度的差异,提出一种疏散引导人责任区动态规划方法,使研究结果更适用于开放性公共场所的日常安全防范与管理。本研究可有效降低应急疏散风险,为开放性公共场所安全防范和应急疏散管理提供决策支持。

(2) 通过上海市徐汇区滨江绿地空间的案例研究,证实了该方法的可行性和实用性。研究结果表明:① 疏散人员和疏散引导人空间布局存在较强的相关性,不同时刻疏散人员的空间变化显著影响疏散引导人的数量分配及其空间位置;② 疏散引导人优化布局后的疏散时间成本显著低于人为布局情景;③ 障碍物的存在会影响疏散人员与疏散引导人之间的通视性,增加疏散引导成本,降低疏散引导效率;④ 不同区域疏散引导人责任区的数量与该区域不同时间段疏散人员数量占比高度相关,且疏散引导人责任区的划分受该时间段疏散人员空间分布影响。

(3) 一般情况下,上海市徐汇区滨江绿地空间实际布局的疏散引导人数量为8~10人左右,与本文研究中的早上时间段所需疏散引导人数量相对应。通过研究分析可知,节假日该区域的疏散引导人在数量上只能满足早上时间段的疏散引导工作需求。在上午中午时间段、傍晚时间段大约需要15名左右的疏散引导人,而人流量最高的下午时间段则需要现有疏散引导人数量的3~4倍左右。可见,在数量上,该区域日常所布局的疏散引导人不能满

足节假日期间该区域所需。为降低该区域的安全风险,加强安全防范,政府可在节假日的不同时间段适当增加该区域疏散引导人数量,以满足节假日不同时间段对疏散引导人的不同需求情况。从空间分布来看,在节假日的上午中午时间段、下午时间段,研究区西南部(龙美术馆区、攀岩区、滨江步道区)人群容易出现高度聚集,尤其是龙美术馆区域众多障碍物对于引导通视性的影响,更需要进行重点的安全防范。因此,政府需加强该重点区域的疏散引导建设,布局充足的疏散引导人并设计合理的疏散引导方案。

(4) 本文提出的方法可作为不同尺度应急疏散管理中进行疏散引导人初始布局的基本方法。在今后的研究中将进一步深入完善研究内容,包括:① 进一步考虑疏散人员的不同行为对于疏散引导人空间布局的影响;② 探讨不同类型的地物(如台阶、草坪、树丛等)对疏散引导效率的影响;③ 研究该方法在不同尺度应急疏散管理中的应用。

## 参考文献(References)

- [1] Yang Y C, Yu J, Wang C Y, et al. Risk assessment of crowd-gathering in urban open public spaces supported by spatio-temporal big data [J]. Sustainability, 2022, 14: 6175. doi: 10.3390/su14106175.
- [2] 胡成, 郭婧婷, 李强, 等. 开放性公共场所人群聚集风险和关键点评估方法 [J]. 中国安全科学学报, 2015, 25 (12): 164-169. [Hu Cheng, Guo Jingting, Li Qiang, et al. Method for evaluating crowd risk and identifying critical nodes in open public places. China Safety Science Journal, 2015, 25(12): 164-169.]
- [3] 余肖禹, 谢科范, 梁本部. 应急避难场所感知与疏散行为的关系研究 [J]. 管理学报, 2020, 17(6): 931-936. [Yu Xiaoyu, Xie Kefan, Liang Benbu. The relationship between emergency shelter perception and evacuation behavior. Chinese Journal of Management, 2020, 17(6): 931-936.]
- [4] Urbina E, Wolshon B. National review of hurricane evacuation plans and policies: A comparison and contrast of state practices [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2003, 37(3): 257-275.
- [5] Bayram V. Optimization models for large scale network evacuation planning and management: A literature review [J]. Surveys in Operations Research and Management Science, 2016, 21(2): 63-84.
- [6] 崔喜红, 李强, 陈晋. 大型公共场所动态引导人移动路径设计方法 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(11): 48-54,

177. [Cui Xihong, Li Qiang, Chen Jin. An algorithm for the moving route of evacuation leader in public facilities. *China Safety Science Journal*, 2008, 18(11): 48-54, 177. ]
- [7] Abdelghany A, Abdelghany K, Mahmassan H, et al. Modeling framework for optimal evacuation of large-scale crowded pedestrian facilities [J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 237(3): 1105-1118.
- [8] 钟少波, 余致辰, 杨永胜, 等. 基于社会力模型的机场人员疏散建模研究 [J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(10): 3648-3656. [Zhong Shaobo, Yu Zhichen, Yang Yongsheng, et al. Study on evacuation modeling of airport based on social force model. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(10): 3648-3656. ]
- [9] 陈长坤, 孙华锴, 童蕴贺, 等. 基于元胞自动机的火源威胁下人员疏散模型 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(10): 47-52. [Chen Changkun, Sun Huakai, Tong Yunhe, et al. Personnel evacuation model under fire source threat based on cellular automata. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(10): 47-52. ]
- [10] Kirchner A, Schadschneider A. Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2002, 312(1/2): 260-276.
- [11] 李强, 崔喜红, 陈晋. 大型公共场所人员疏散过程及引导作用研究 [J]. *自然灾害学报*, 2006, 15(4): 92-99. [Li Qiang, Cui Xihong, Chen Jin. Study on occupant evacuation process from large public facilities and effect of guidance. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(4): 92-99. ]
- [12] Cao S C, Song W G, Lv W. Modeling pedestrian evacuation with guiders based on a multi-grid model [J]. *Physics Letters A*, 2016, 380(4): 540-547.
- [13] 崔喜红, 李强, 李学东, 等. 公共场所疏散引导人静态布局优化算法及其应用 [J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(22): 6285-6289. [Cui Xihong, Li Qiang, Li xuedong, et al. Optimization algorithm for static location of evacuation leader in public facilities and its application. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(22): 6285-6289. ]
- [14] Ribas I, Companys R, Tort-martorell X. An iterated greedy algorithm for the parallel blocking flow shop scheduling problem and sequence-dependent setup times [J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 184: 115535. doi: 10.1016/j.eswa.2021.115535.
- [15] 袁群, 左弈. 基于改进混合遗传算法的冷链物流配送中心选址优化 [J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(11): 1795-1800. [Yuan Qun, Zuo Yi. Selection of cold chain logistics distribution center location based on improved hybrid genetic algorithm. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2016, 50(11): 1795-1800. ]
- [16] 裴时域, 李元香. 改进的模拟退火算法在物流配送中心选址中的应用 [J]. *统计与决策*, 2021, 37(9): 172-176. [Pei Shiyu, Li Yuanxiang. Improved simulated annealing algorithm for logistics distribution center site selection. *Statistics and Decision*, 2021, 37(9): 172-176. ]
- [17] 李显良, 周庆平, 谭长庚, 等. 基于蚁群算法的城市体育设施优化选址 [J]. *计算机与现代化*, 2020(3): 33-39. [Li Xianliang, Zhou Qingping, Tan Changgeng, et al. Optimal location of urban sports facilities based on ant colony algorithm. *Computer and Modernization*, 2020(3): 33-39. ]
- [18] Hu F Y, Xu W, Li X. A modified particle swarm optimization algorithm for optimal allocation of earthquake emergency shelters [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012, 26(9): 1643-1666.
- [19] 陶卓霖, 程杨, 戴特奇, 等. 基于公平最大化目标的2020年北京市养老设施布局优化 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(12): 1609-1616. [Tao Zhuolin, Cheng Yang, Dai Teqi, et al. Spatial optimization of residential care facility locations in 2020 in Beijing: Maximum equity in accessibility. *Progress in Geography*, 2015, 34(12): 1609-1616. ]
- [20] Wang Z C, Cao Z G, Fan F, et al. Shape optimization of free-form grid structures based on the sensitivity hybrid multi-objective evolutionary algorithm [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44: 102538. doi: 10.1016/j.job.2021.102538.
- [21] 柯新利, 邓祥征, 刘成武. 基于分区异步元胞自动机模型的耕地利用布局优化: 以武汉城市圈为例 [J]. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1442-1450. [Ke Xinli, Deng Xiangzheng, Liu Chengwu. Interregional farmland layout optimization model based on the partition asynchronous cellular automata: A case study of the Wuhan City circle. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1442-1450. ]
- [22] 孙小慧, 刘锴, 左志. 考虑时空限制的电动汽车充电站布局模型 [J]. *地理科学进展*, 2012, 31(6): 686-692. [Sun Xiaohui, Liu Kai, Zuo Zhi. A spatiotemporal location model for locating electric vehicle charging stations. *Progress in Geography*, 2012, 31(6): 686-692. ]
- [23] 许可, 宫华, 刘芳, 等. 基于离散粒子群算法的应急物资选址与调度 [J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(6): 15-21. [Xu Ke, Gong Hua, Liu Fang, et al. Research on emergency resources storage facilities location and scheduling based on binary particle swarm optimization algorithm. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2018, 35(6): 15-21. ]
- [24] Zhou M, Dong H R, Zhao Y B, et al. Optimal number and location planning of evacuation leader in subway sta-



- tions [J]. IFAC-Papers OnLine, 2018, 51(9): 410-415.
- [25] 齐蔓菲, 於家, 姜丽, 等. 城市道路的人员疏散风险评价研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(3): 12-18. [Qi Manfei, Yu Jia, Jiang Li, et al. Research on risk assessment of personnel evacuation on urban roads. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(3): 12-18. ]
- [26] 左粮瑜, 毛华松, 廖聪全, 等. 公共空间疏散风险点定量综合评估方法研究: 以重庆动物园为例 [J]. 风景园林, 2018, 25(6): 90-95. [Zuo Liangyu, Mao Huasong, Liao Congquan, et al. Research on quantitative comprehensive evaluation method of public space evacuation risk nodes: Case study on Chongqing Zoo. Landscape Architecture, 2018, 25(6): 90-95. ]
- [27] Ma Y F, Zhong P, Xu B, et al. Spark-based parallel dynamic programming and particle swarm optimization via cloud computing for a large-scale reservoir system [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126444. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126444.
- [28] Shi Y H, Eberhart R. Monitoring of particle swarm optimization [J]. Frontiers of Computer Science in China, 2009, 3(1): 31-37.
- [29] Church R L, Roberts K L. Generalized coverage models and public facility location [J]. Papers of the Regional Science Association, 1983, 53(1): 117-135.
- [30] Karasakal O, Karasakal E K. A maximal covering location model in the presence of partial coverage [J]. Computers and Operations Research, 2004, 31(9): 1515-1526.
- [31] Berman O, Drezner Z, Krass D. Generalized coverage: New developments in covering location models [J]. Computers and Operations Research, 2010, 37(10): 1675-1687.
- [32] 聂影, 曹灿景. 景观园林植物与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 102-108. [Nie Ying, Cao Canjing. Landscape garden plants and applications. Beijing, China: China Water and Power Press, 2011: 102-108. ]
- [33] Lo S M, Fang Z, Lin P, et al. An evacuation model: The SGEM package [J]. Fire Safety Journal, 2004, 39(3): 169-190.
- [34] 周宇杭, 王文明, 李泽彬, 等. 基于A星算法的移动机器人路径规划应用研究 [J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(13): 1-3, 10. [Zhou Yuhang, Wang Wenming, Li Zebin, et al. Application research of mobile robot path planning based on A-star algorithm. Computer Knowledge and Technology, 2020, 16(13): 1-3, 10. ]
- [35] Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths [J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107. doi: 10.1109/TSSC.1968.300136.
- [36] 曼纽尔·弗雷德·劳森. 旅游与游憩规划设计手册 [M]. 唐子颖, 吴必虎, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 107-109. [Baud-Bovy M, Lawson F. Tourism and recreation handbook of planning and design. Translated by Tang Ziyang, Wu Bihu, et al. Beijing, China: China Architecture and Building Press, 2004: 107-109. ]
- [37] 方家, 王德, 谢栋灿, 等. 上海顾村公园樱花节大客流特征及预警研究: 基于手机信令数据的探索 [J]. 城市规划, 2016, 40(6): 43-51. [Fang Jia, Wang De, Xie Dongcan, et al. Research on dynamic change and early warning of large tourist flow based on mobile signal data analysis: A case study of Gucun Park Sakura Festival in Shanghai. City Planning Review, 2016, 40(6): 43-51. ]
- [38] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. Acta Geographica Sinica. 2017, 72(1): 116-134. ]
- [39] 唐晓华, 陈阳, 张欣钰. 中国制造业集聚程度演变趋势及时空特征研究 [J]. 经济问题探索, 2017(5): 172-181. [Tang Xiaohua, Chen Yang, Zhang Xinyu. Study on the evolution trend of manufacturing agglomeration degree and spatial and temporal characteristics in China. Inquiry into Economic Issues, 2017(5): 172-181. ]

## Allocation optimization of evacuation leaders in open public places: A case study of Binjiang Green Space in Xuhui District, Shanghai

NIU Yanyan<sup>1</sup>, YU Jia<sup>1,2\*</sup>, LU Dawei<sup>1</sup>, MU Renwu<sup>1</sup>, WEN Jiahong<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

2. Key Innovation Group of Digital Humanities Resource and Research, Shanghai Normal University,  
Shanghai 200234, China)

**Abstract:** Emergency evacuation guidance is important in the safety planning of urban open public places. In order to solve the problem of spatial allocation of evacuation leaders at the early stage of emergency evacuation, a new allocation optimization method of evacuation leaders in open public places was built based on the particle swarm algorithm and gradual covering model. The method considers the influence of obstacles on the intervisibility, the spatial covering range, the distance decay effect of leaders' guidance, and the guided evacuee number threshold for each evacuation leader. Taking Binjiang Green Space in Xuhui District, Shanghai Municipality as an example, we conducted the allocation optimization of evacuation leaders. Using the agent-based evacuation model, emergency evacuation guidance simulations were conducted to verify the feasibility of the method by comparing the evacuation efficiency before and after the optimization. Meanwhile, considering the difference of crowd distributions in several time periods of a day, the dynamic planning of leaders' responsibility areas was conducted. The analysis results show that the demands for evacuation leaders varied at different moments and were proportional to the number of evacuees. The evacuation time cost of the optimized evacuation leader allocation scenario was much lower than that of the artificial allocation scenario. The division of the evacuation leaders' responsibility areas helped to clarify the area that each leader was responsible for and the daily safety precautions that should be taken under the limited leader number situation. This study can provide a decision basis for the spatial allocation of evacuation leaders in urban open public places, reduce the potential safety risks, and promote the construction of urban public safety.

**Keywords:** urban open public place; evacuation leader; particle swarm optimization (PSO); gradual covering model; Shanghai Municipality