智慧景观

基于行人仿真模拟的大运河滨水景区人流分析及空间优化

周 曦 张 凡 杨世琪 薛敬弋 张 芳

（苏州科技大学建筑与城市规划学院，江苏苏州 215000）

摘要：【目的】引入 MassMotion 行人仿真模拟平台对大运河滨水景区的人流进行 定量分析，分析景区空间拥堵与空间利用率的问题，提出相应的空间优化策略，突破以往景区人流分析缺乏精确计算的难题，为滨水景区的人流精细化管控提供新的技术路径。【方法】选取同岬岛型、临水型、夹河型 3 种不同类型的大运河滨水景区为对象，利用 MassMotion 仿真模拟不同类型运河滨水景区大人流量，首先，对各类游客进行实地测量确定仿真模拟的各项参数；然后，将数据导入地图模型分析景区的空间拥堵程度与空间利用率，计算平均密度、最大密度、群体计数、占用时间、个体计数与路线图等指标。【结果】大人流量时段内各景区中大部分区域都存在拥堵问题，拥堵点出现在主干道、景点及其交汇处；拥堵原因有道路狭窄、缺乏缓冲空间、路线规划差等。由此提出营造过渡空间、新增出入口、拓展通行宽度、新增游览路径等优化方案，经模拟检验优化后景区拥堵情况大幅改善，空间利用率提升。【结论】行人仿真模拟分析是景区人流测度及优化的有效方法。

关键词：滨水景区；行人仿真模拟；MassMotion；人流分析；空间优化

DOI：10.12169/zgcsly.2025.11.22.0001

Pedestrian Flow Analysis and Spatial Optimization of the Grand Canal Waterfront Scenic Area Based on Pedestrian Simulation

Zhou Xi Zhang Fan Yang Shiqi Xue Jingyi Zhang Fang

（College of Architecture and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, Jiangsu, China）

Abstract: 【Objective】 The MassMotion pedestrian simulation platform is introduced to conduct quantitative analysis of pedestrian flow in canal waterfront scenic areas and evaluate spatial congestion and space utilization. Corresponding spatial optimization strategies are proposed to overcome the lack of precise calculation for scenic area visitor flow analysis, thereby providing a new technical pathway for refined pedestrian flow management in waterfront scenic areas.【Method】 Three different types of Grand Canal waterfront scenic areas, namely, the cape-island scenic areas, waterfront-adjacent scenic areas, and river-intervening scenic areas, are selected as the study objects. MassMotion simulation platform is employed to model high-volume pedestrian movement in the three types of canal waterfront scenic area. On-site measurements of various types of visitors are conducted to determine the simulation parameters. Subsequently, the data are imported into the map model to analyze spatial congestion levels and space

收稿日期：2025-11-22

* 基金项目：江苏省社会科学基金项目（25WYB-003）；江苏省十四五重点学科（建筑学）

第一作者：周曦，男，1980 年生，博士，副教授，研究方向为滨水空间、大运河文化景观、立体绿化。E-mail：48489677@qq.com

通信作者：张芳，女，1983 年生，博士，教授，研究方向为城市更新、街区活力分析。E-mail：1647583042@qq.com

utilization rate within the scenic areas, and calculate metrics including average density, maximum density, group count, occupancy time, individual count, and route mapping.【Result】 During high-volume visitor periods, congestion is prevalent across most zones within each scenic area. Congestion hotspots occur at main thoroughfares, attractions, and their intersections, and the causes include narrow pathways, insufficient buffer spaces, and poor route planning. In response, optimization measures are proposed, including creation of transitional spaces, addition of new entrances and exits, widening of passage widths, and introduction of alternative touring routes. Post-optimization simulations confirm a substantial alleviation of congestion and improved space utilization.【Conclusion】 Pedestrian simulation analysis constitutes an effective method for measuring and optimizing visitor flow in scenic areas.

Keywords: waterfront scenic area; pedestrian simulation; MassMotion; pedestrian flow analysis; spatial optimization

后疫情时代户外游览需求显著增长，滨水景区因其生态功效与休憩功能[1]，迅速成为城市居民与外来游客出行游玩的热门目的地，每逢节假日客流量极大，常出现游道拥挤、节点滞留等现象，严重影响游览体验，甚至可能引发踩踏等安全事故。因此，景区人流承载量研究愈发具有现实意义。

早期研究多聚焦于生态环境对游客数量的容纳上限，通过构建目标函数优化经济和生态目标，在资源约束下进行优化[2]。随后逐步扩展至空间承载量、设施承载量与社会心理承载量等多维度内容，用以综合衡量景区在保证安全、体验与环境质量前提下的最佳接待规模[3]。近年来，随着人群时空分布监测技术的发展，有研究者进行投入—产出分析，用于评估旅游业资源投入与经济产出的平衡[4]，更多研究者关注动态承载量的计算与预测，以支持景区实时调控和科学限流策略的制定[5]。但是，目前景区承载量相关理论研究多是依据景区面积、旅游服务资源、生态环境等因素推算，对人流的测度多是依照景区道路面积、长度推测，对空间环境容量小的运河滨水景区来讲误差很大。

随着计算机仿真技术在建筑与规划领域中逐步推广[6]，发展到针对人群行为的仿真模拟[7]，目前有 Unity3D、MassMotion、Pathfinder、PyroSim、Anylogic 等计算平台。通过行为个体的虚拟仿真计算，能较好地模拟场景中人群活动，其相比于实测具有成本低、速度快、效率高、准确度高等优势，而且能模拟实测人流量之外的极端情况。国内目前人流模拟仿真集中于疏散预案制定、交通设施运营评估及公共步行空间设计[8]。随着仿真理论及软件的不断发展，行人仿真应用范围逐渐从室内转向户外，由紧急疏散转向日常人行，从群体仿真转向个体仿真，实现自主代理、路径选择、自组织模型[9]。相比其他算法，MassMotion 融入了更先进的人工智能技术，能够真实模拟行人的自主决策、连续空间行走等复杂行为，因此其更适宜于大尺度户外滨水开放景区。研究利用 MassMotion 仿真模拟不同类型运河滨水景区大人流量，分析空间拥堵状况与空间利用率，并根据分析结果提出了相应的空间优化策略，突破了以往景区人流分析缺乏精确计算的难题，为滨水景区的人流精细化管控提供了新的技术路径。

1　研究区概况

京杭大运河苏州段北起望亭南至平望，历史上航道几经变迁。《大运河（苏州段）遗产保护规划》中除现通航段还包含环古城河、上塘河、山塘河、胥江等古运河段，历史上苏州很多风景名胜景区沿运河而建。研究选取苏州 3 个不同类型的运河滨水景区作为研究对象，按景区与运河的关系分为岬岛型、临水型、夹河型 3 种，分别为枫桥景区、盘门景区、山塘街景区。

枫桥景区（图 1）位于苏州市寒山寺一侧，景区主体为京杭大运河水中的岛屿，岛屿面积 6 hm^2，内含渔隐桥、一枝园、吴门古韵戏台、漕运博物馆等众多景点；盘门景区（图 2）位于苏州古城西南隅城墙与护城河一侧，占地 24.86 hm^2，古迹众多，人文景观丰富，其中瑞光塔、水陆城门、吴门桥均为全国重点文物保护单

位；山塘街景区（图 3）位于古城西北角沿展山塘河开，全长约 3.6 km，为典型的江南水乡河街格局，素有“十里山塘”的美誉。



图 1 枫桥景区总平面及行人参观模式

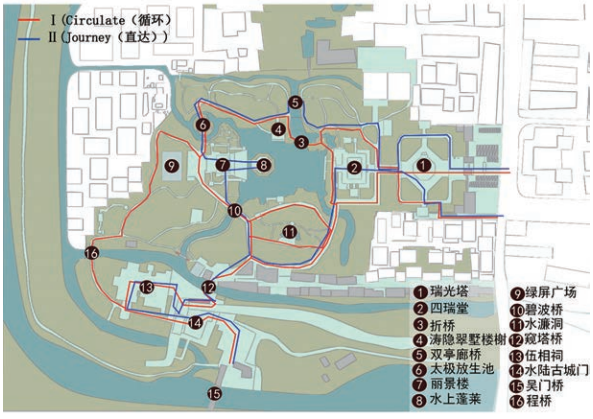


图 2 盘门景区总平面及行人参观模式

2 研究方法

2.1 MassMotion 行人仿真模拟技术简介

2.1.1 MassMotion 行人仿真模拟计算平台

MassMotion 为英国 OasysArup 公司研发的一款应对复杂人流的定量分析软件[9]，能通过分析距离、地形及障碍计算各种可行路径消耗的成本，从而自主选择起点与终点之间的低成本路径，也可指定特定的行为路径[6]。算法核心是社会力模型[10]和最小成本模型，可导出数据进行定量分析。分析结果高度贴近行人的真实行为轨迹，已得到了国内外许多研究学者的应用[11]。

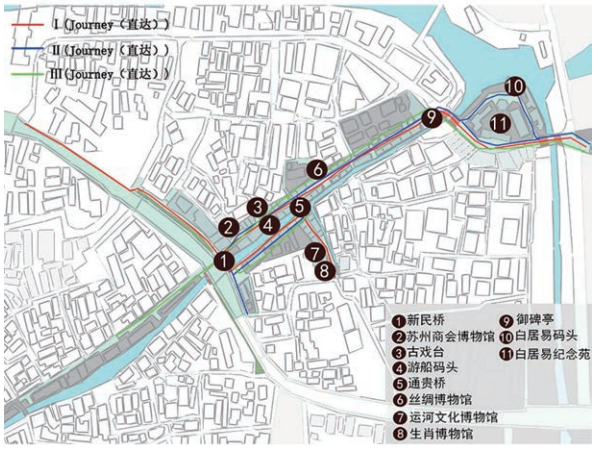


图 3 山塘街景区总平面及行人参观模式

2.1.2 MassMotion 模型的数据成果形式

通常选取行人密度反映空间的拥挤程度；选取群体/个体计数、占用时间、个体路线反映空间利用率[6]。

行人密度包含平均密度与最大密度。空间内行人服务等级的划分，以 Fruin 行人密度服务水平标准（表 1）为依据，将人群密度分为 A～F6 个级别，以冷暖不同颜色标记[11]。

群体计数图用来测量指定区域内随时间变化的个体总数。累计容量计数图则表示个体在整个时间段累计人流量总数，个体总数越多，空间利用率相对越高。

表 1 Fruin 服务等级指标

服务等级	密度(人/m^2)	行人状态	标识色
A	<0.31	行人可自由选择步速,行动自由,不发生冲突	
B	0.31～0.43	相交和反方向的人流有较小摩擦,行动较为自由,能保持正常步速	
C	0.43～0.72	行人可能会发生抵触,活动受到一定阻碍且发生细微冲突,行人的选择速度与通行的能力受到限制	
D	0.72～1.08	行人不能避免冲突且正常步速受限,抵触级别较高	
E	1.09～2.17	行动受到限制,与相交和相反的人流形成较大阻碍,行走迟缓,行为表现为慢行	
F	>2.17	行人会与相邻的个体发生频繁接触,行动完全受限,步行迟缓,个体会持续前进,背后个体继续尝试向前,导致拥挤[6]	

占用时间地图显示模拟中的任何个体在地图上每个点位所使用的时间量，颜色越暖表明个体占用时间越长，空间利用率越高[12]。

个体计数图显示在给定时间范围内查看表面上每个点的个体数量。个体路线图显示个体倾向于行走的区域。当个体移动至某一路径时，地图

上会覆盖一条半透明的踪迹图案，通过叠加所有个体的踪迹能绘制出模拟路径的概率分布地图。因此，通过个体计数地图以及个体路线地图能够反映景区游客主要游览路线。

2.1.3　MassMotion 仿真模拟的技术路线

行人仿真模拟分析的核心是现状实测与模拟分析，一般分为 3 个步骤（图 4）。1）现状实测。模拟仿真需要现状调研提供基础数据，输入平台后进行模型建构：一是根据景区实测图纸建立三维模型，如 SketchUp；二是景区人流实测，对核心截面的人流量、路径选择偏好及停留时长统计与分析。2）模拟分析。首先将模型导入 MassMotion 平台，完成场景建模与各项参数设置，再依据前期实测数据设置个体行为参数；随后开展模拟分析计算，从空间拥堵程度与空间利用效率两个方面进行评估，以各类分析图呈现结果[13]：最后以采样范围内的平均密度、最大密度反映景区空间拥挤程度；采用群体计数、占用时间、个体计数与路线反映景区各景点的空间利用情况。3）方案优化。在分析的基础上针对各问题提出优化方案，代入模型后再次计算，比较优化前后的差异以验证其成效，最终得到适宜的优化方案。

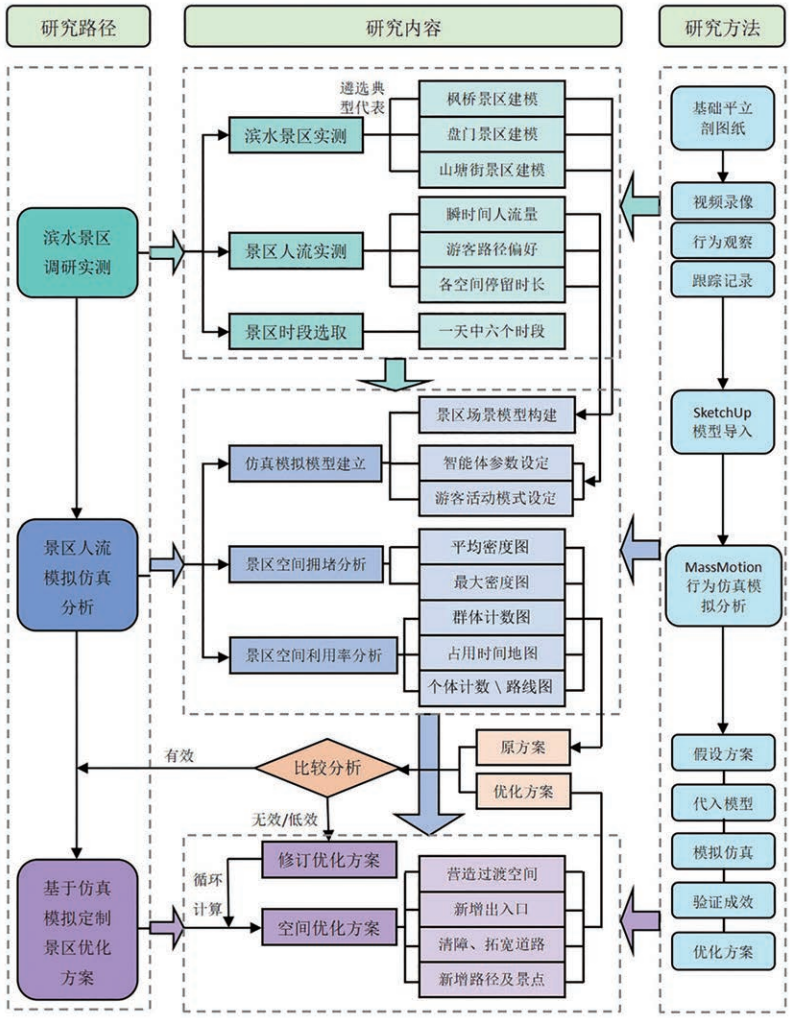


图 4　研究技术路线

2.2　MassMotion 模型中行人参数实测

实地测试选取景区游客作为模拟主体，采用控制变量法控制调研起止时间、持续时长及观测点位，并确保数据采集方法与整理记录保持一致[9]。选取一天中 6 个时段（图 5），对 3 个景区内各出入口、道路以及景点进行人工观测、跟随调查、航拍采集等调研，统计景区各出入口在每个时段的总人数、游客类型、通行速率、空间人流量，以及不同类型游客在不同景点停留时间。

2.2.1 行人流量实测

行人流量包括总流量，各出入口行人流量，以及各个时间段行人流量（图 5），通过行人流量能够得知不同人群类型在不同空间、不同时间段行人分布的时间和空间特征。

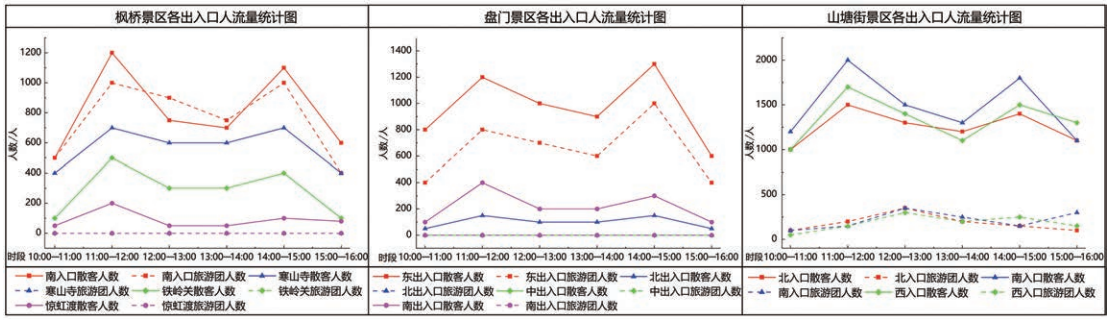


图 5 各景区出入口行人流量

2.2.2 行人通行速度设定

人群通行速度的参数设定以游客步行速度实测数据为基准，并考量个体差异确定速度取值范围。游客分为两种类型：1）旅游团，在导游的带领下沿着固定路线参观，通行速度约在速度 1.4 m·s^{-1}（1.2~2.0 m·s^{-1}），人数为 30~45 人；2）散客，无固定路线，行速不定，个体速度呈正态分布（0.65~2.05 m·s^{-1}），平均值为1.35 m·s^{-1}，标准偏差为 0.25 m·s^{-1}，人数为 1~10。

2.2.3 行人参观模式设定

行人参观模式设定为直达与循环两种。直达模式是指出行矩阵，个体从起点出入口创建并指示他们寻找目的地出入口，完成任务后退出模拟；循环模式是指循环游走，个体从其中一个起点出入口进入模拟，并在几个游走出入口之间移动，然后从其中一个出入口作为目的地退出模拟（图 1~3）。

2.2.4 景点停留时间实测

旅游团与散客在景区各景点的停留概率和停留时间不同，亦需在调研后作为参数设置入仿真模型（表 2）。此外，设置景区各个出入口闸机平均等待时间为 2 s/人，扫码时长 10~30 s/人。

表 2 各景区主要景点行人停留时间统计数据

游客类型	参数	枫桥景区各景点												
		渔隐桥	水驿长廊	唐灯	报春轩	一枝园	吴门古韵戏台	江村桥	漕运展示馆	听钟桥	惊虹渡	铁岭关史迹陈列	枫桥	铁岭关
旅游团	概率/%	100	—	20	100	100	50	—	—	100	—	—	100	100
	停留时间/s	150~330	—	0~40	0~10	90~300	60~300	—	—	30~120	—	—	0~30	300~600
散客	概率/%	100	30	100	40	100	30	30	30	100	30	20	100	100
	停留时间/s	0~60	0~120	0~30	0~30	0~240	0~30	0~90	60~300	0~120	0~180	60~600	0~60	0~420
游客类型	参数	盘门景区各景点												
		瑞光塔	四瑞堂	唐井	折桥	双亭廊桥	涛隐翠墅楼榭	水濂洞	太极放生池	丽景楼	水上蓬莱	窥塔桥	伍相祠	水陆古城门
旅游团	概率/%	50	100		50	50	50	30	100	100	50	100	100	100
	停留时间/s	0~360	0~420	0~10	0~10	0~120	0~240	0~70	0~30	0~360	0~300	0~15	0~420	0~600
散客	概率/%	100	100	20	30	40	30	30	70	100	50	100	100	100
	停留时间/s	0~300	0~300	0~10	0~10	0~120	0~180	0~70	0~30	0~300	0~300	0~15	0~300	0~600
游客类型	参数	山塘街景区各景点												
		新民桥	苏州商会博物馆	古戏台	游船码头	通贵桥	丝绸博物馆	生肖博物馆	运河文化博物馆	御碑亭	白居易纪念苑	白居易码头	山塘府邸	真趣园
旅游团	概率/%	100	100	50	30	100	100	50	50	30	100	30	50	20
	停留时间/s	0~30	0~300	0~30	0~60	0~30	0~420	0~600	0~600	0~180	0~300	0~120	0~180	0~60
散客	概率/%	100	50	100	30	100	50	20	30	30	50	30	20	10
	停留时间/s	0~30	0~300	0~10	0~30	0~30	0~120	0~300	0~300	0~10	0~420	0~30	0~10	0~300

3　结果与分析

3.1　景区空间拥堵状况

3.1.1　平均密度

从图 6 可知：枫桥景区中唐灯、一枝园入口、寒山寺观景台与沿河走廊、听钟桥处最拥挤；盘门景区中唐井、太极放生池处最为拥挤；山塘街景区中新民桥、通贵桥、山塘府邸处、沿河道路以及沿着内街道路最为拥挤。这些区域均达到 E~F 级。

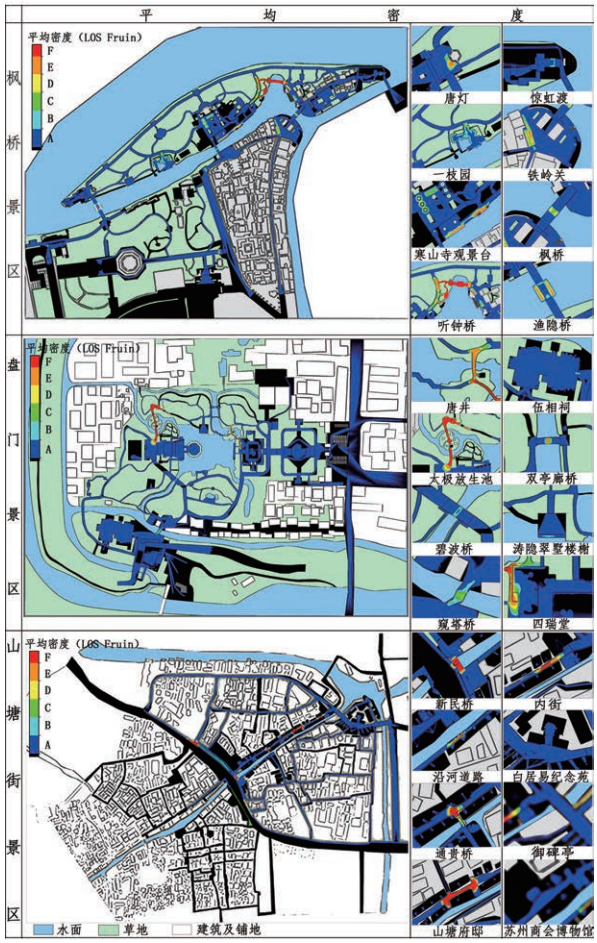


图 6　枫桥景区、盘门景区、山塘街景区平均密度

3.1.2　最大密度

图 7 所示，3 个景区在节假日大人流量情况下，大部分区域人群密度级别在 C~F，表明景区内大部分空间存在拥堵情况。其中，枫桥景区听钟桥区域，盘门景区中唐井、太极放生池区域，山塘街景区中新民桥、通贵桥、沿河道路以及部分沿着内街道路区域最拥挤，达到 F 级，这些区域为交通要道兼景观点，严重影响了游览体验。

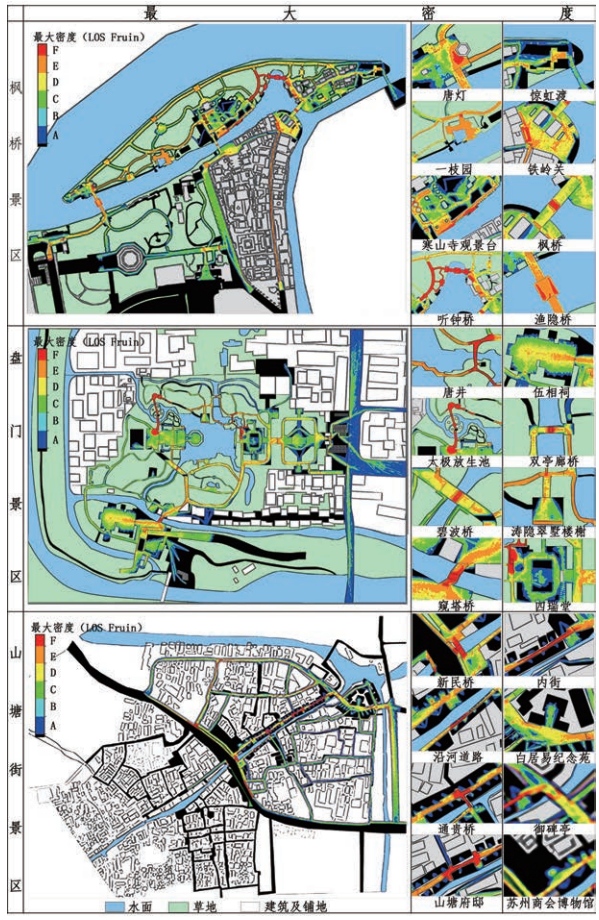


图 7　枫桥景区、盘门景区、山塘街景区最大密度

3.2　景区空间利用率

3.2.1　群体计数

由图 8 可知，枫桥景区游客最偏爱愁眠轩，其次是枫桥、听钟桥；盘门景区以水路城门最受欢迎，太极放生池游客量随时间变化最明显；山塘街游客最青睐新民桥和通贵桥，沿河道路作为主通道流量也持续高位。这些区域的空间利用率相应较高。

3.2.2　占用时间

图 9 显示：枫桥景区人流占用时间较高的区域集中在主要景点，如渔隐桥、唐灯、一枝园、吴门古韵戏台、听钟桥等处，而外围大运河健身步道空间利用率相对较低；盘门景区主要集中在唐井、太极放生池、窥塔桥、伍相祠入口处等处；山塘街主要集中在新民桥、通贵桥、沿河以及沿街道路处。

3.2.3　个体计数与个体路线

枫桥景区游览的主要路径偏向于沿河内部道路，集中在各个景区附近；盘门景区游览路线分

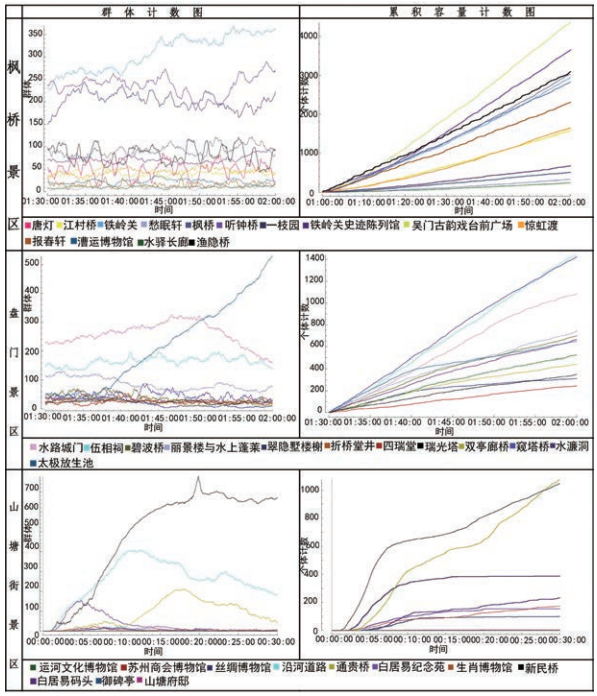


图 8 枫桥景区、盘门景区、山塘街景区 11：30—12：00 群体计数与累计容量计数

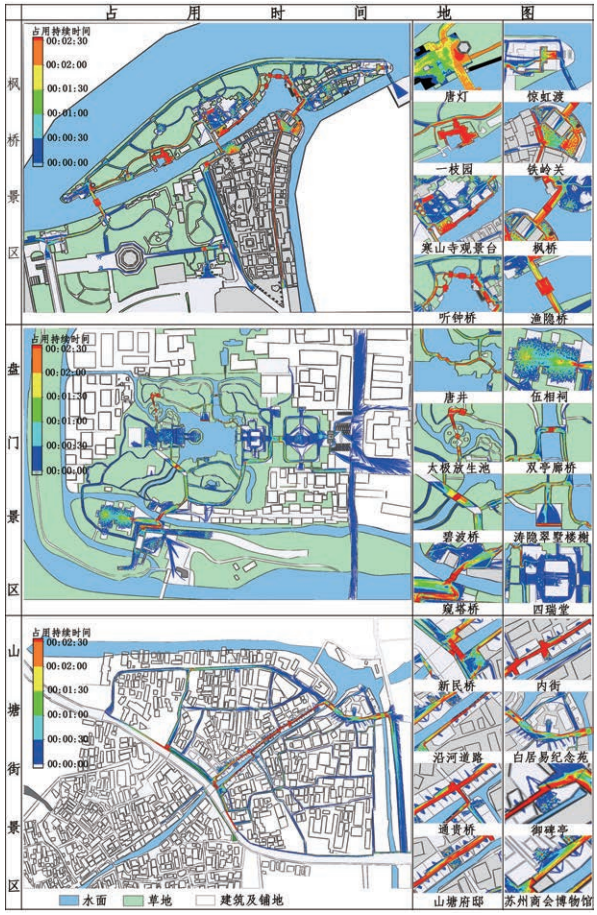


图 9 枫桥景区、盘门景区、山塘街景区占用时间图

布较均匀；山塘街景区游览路线偏向于沿河以及商铺内部道路上。这些部分空间利用率较高（图 10 所示红色区域）。

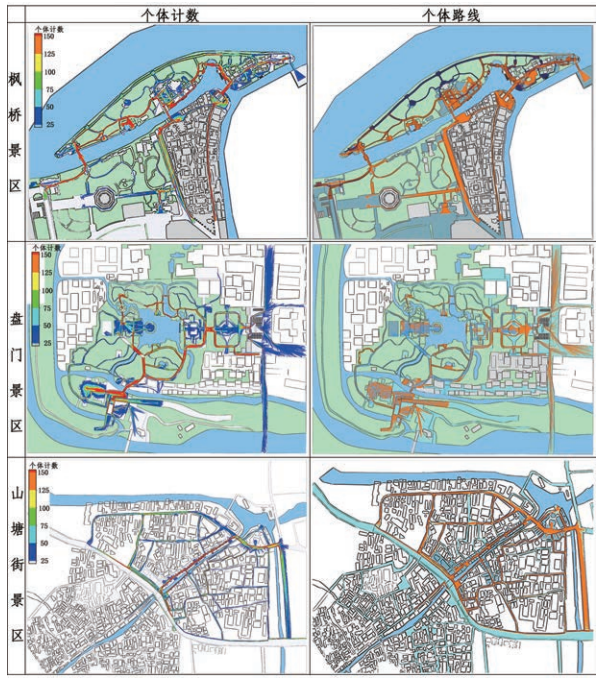


图 10 枫桥景区、盘门景区、山塘街景区个体计数与个体路线图

3.3 景区行人仿真模拟结果呈现的问题

通过岬岛型、临水型、夹河型 3 种不同空间类型的滨水景区人流分析可知，行人空间利用率均呈现出游人偏向沿滨水空间进行活动的共性，但 3 个景区也有所区别：对于岬岛型滨水空间，行人主要沿着岬岛内部近陆一侧空间呈现线性活动，如枫桥景区空间利用率较高的几个区域都集中在临水靠岸内侧，而靠外侧的大运河健身步道空间利用率较低；对于临水型滨水空间，行人主要环绕水域的景点空间进行活动，如盘门景区空间利用率较高的景点均如此；对于夹河型滨水空间，如山塘街景区，行人主要沿着滨水两岸呈线状活动。此外，3 类景区呈现出的很多空间拥堵问题也是具有共性的：

1）道路狭窄导致通行受阻。滨水景区虽然面积都较大，但是大部分用地都为绿地与水域，实际可供游人通行的道路硬地面积有限[14]，很多人行主要通道宽度窄，局部遇到桥梁、街巷、滨河走廊等还进一步收窄，形成局部堵点。叠加管理（如局部道路上铺满商铺餐桌椅）加重了问题。

2）重要节点缺乏过渡缓冲空间。景点是游客

聚集停留的重要区域，部分景点与交通空间混杂，景点与道路间缺乏足够的过渡缓冲空间，导致游客停留观赏景点时阻碍了他人的通行。

3）部分景区路线规划较差。滨水景区由于水域阻隔游览路线安排受限，导致部分游览路线规划不甚合理，如部分景点出口与入口处在同一位置，进出人流对向拥堵；部分景点间无路直达需绕行，这 加重了道路通行负担；路线上还存在一些 T 型路口和断头路，进一步降低了行人可达性。

4　基于仿真模拟的景区空间优化

在仿真模拟分析的基础上，以枫桥景区为例，制定针对性优化方案，调整模型参数和场景模拟方案效果，通过对比优化前后结果验证优化方案的成效（图 11）。

4.1　营造入口过渡空间

唐灯景点紧邻道路入口，游览空间与交通空间混杂缺乏足够的过渡空间，无论是平均密度与最大密度，此处人群密度均达 E~F 级，道路严重拥挤。优化方案中在现有基础上扩大入口宽度，增设入口广场，营造景点与道路之间的过渡空间，拓宽唐灯景点的游览空间，增强道路的应急避险韧性。模拟结果显示改善后拥堵等级明显下降，F 级拥堵空间消失。

4.2　重要景点新增出入口

一枝园景区只有一个出入口且空间狭窄，其入口处拥堵达 F 级。设计优化中在景点北侧新增出口空间，让游客有更多的通行选择，有效地分散了人流。优化后模拟结果显示入口空间拥堵等级降到 E 级。

4.3　清理障碍拓展通行宽度

寒山寺观景区与沿河走廊作为游客主要游览去处，密度等级达 F 级，拥堵情况十分严重。究其原因：一是因为通行空间过于狭窄；二是通道上存在众多障碍物，加重阻碍游客通行效率。优化中清除通道上商铺座椅，适当拓展道路宽度。优化后模拟结果显示拥挤程度从 F 级下降到 E 级，拥堵情况得到一定缓解。

4.4　新增游览路径以及景点

听钟桥作为景区重要景点，是连接漕运博物馆与张继雕像点之间主要通道，也是观景最佳视野处之一，密度达 F 级。因周围空间本已狭小无多余扩展空间，因此采用新增游览路径和景点来分流游客。在漕运博物馆出口处新增拱桥，连接铁岭关景点，并在拱桥中间设置观景平台，同时在听钟桥西侧大运河健身步道处设置大运河文化景点。分流游客优化后 F 级区域大幅下降。

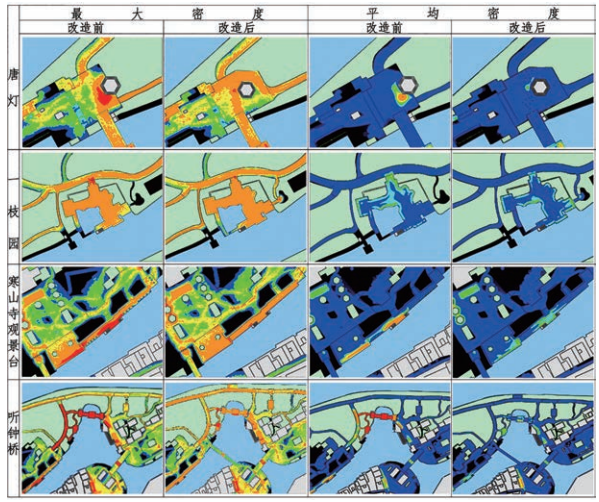


图 11　枫桥景区各节点改造前后对比

5　讨论

行人仿真模拟分析现有研究目前主要已应用在以下几种类型。一是应急疏散类型，如王雷等对北京首钢大跳台的应急疏散研究[15]，通过仿真模拟紧急情况下场馆内人员的自主疏散过程，并针对空间布局与疏散流线设计给出了具体优化建议；二是交通设施的大人流量模拟，如公雅妮对地铁站大厅空间的研究[16]，利用仿真模拟平台识别拥堵节点并提出优化方案；三是公共建筑日常人流模拟，如杨熙等对银泰创意城商业综合体的研究[17]，基于消费者行为个体数据拟合行为仿真模型进行模拟，以实现入口层的空间优化。

本研究吸收了上述 3 类研究的成果，充分利用 Massmotion 计算平台的优势，在 3 个方面形成了自身特色：其一，将人流模拟仿真应用从建筑室内空间拓展至大尺度户外城市空间，通过实地调研合理设置人流参数，证明仿真模拟同样适用于景区人流分析，相比传统计数调研方式具有精度高、真实性强的优势；其二，同一模型通过调节参数可兼顾研究高峰期人流问题与日常游览行为规律，适应面广；其三，利用仿真模拟模型设

计优化方案，代入模型再次计算检验优化方案的成效，做到“调研-模拟-优化”的链路，拓展了仿真模拟的应用路径。

目前主要存在的问题是现阶段行人模拟仿真仍有一定的技术门槛，实操也需要一定的学习成本。从发展趋势来看，仿真平台未来可与实时监测数据相结合，实现模型参数的动态校准，从而提升模拟结果的时效性；借助人工智能技术深度学习游客行为特征，实现精细化模拟人群复杂行为活动。随着技术普及和成本曲线的下降，行人仿真模拟方法有望在景区人流规划与管控中发挥更为广泛和深入的作用。

6 结论

研究结果表明，大运河滨水景区由于受到水域限制易产生人流拥堵问题，影响游览的质量与安全。研究运用 Massmotion 平台进行仿真模拟分析，发现滨水景区人流问题主要集中于局部空间拥堵与部分空间利用率低两大方面。在节假日等大人流量时段内，各景区中游览线路上大部分区域都存在拥堵现象，空间拥堵点主要出现在主干道路、景点及道路与景点交接处。造成拥堵的原因有：道路狭窄、缺乏过渡缓冲空间、路线规划较差等。同时，散客与旅游团两大人流游览线路单一，多集中于景区的滨水空间附近，造成景区其余部分空间利用率低。研究针对这些问题研究提出了系列优化方案，包括营造过渡空间、新增出入口、拓展通行宽度与新增游览路径。经过模拟仿真计算检验，优化后高密度 F 区占比大幅降低，表明通过空间局部优化可以大幅提高游览的舒适度与通行效率，降低了安全隐患。研究方法与技术路径也可为其它类型景区的人流模拟及空间优化提供一定指导意义。综上，说明行人仿真模拟分析是景区人流测度及优化的有效方法。

参考文献

[1]王敏，陈梦璇，宋昊洋.生境质量与游憩服务的耦合协调对滨水空间活力的影响[J].中国城市林业，2022，20(3)：7-13.

[2]刘佳，李莹莹，王娟.中国沿海地区旅游环境承载力与城镇化水平动态关联性分析[J].商业研究，2017(4)：178-185.

[3]唐玉芝，石铁柱，刘潜，等.基于空间场景的海岸带与海域生态承载力及可持续评价[J].地理学报，2023，78(11)：2811-2832.

[4]KLUGER L C，TAYLOR M H，MENDO J，et al.Carrying capacity simulations as a tool for ecosystem-based management of a scallop aquaculture system[J].Ecological Modelling，2016，331：44-55.

[5]杨秀平，翁钢民.旅游环境承载力研究综述[J].旅游学刊，2019，34(4)：96-105.

[6]许凯强，肖毅强.人流仿真模拟在航站楼安检区设计优化中的应用性研究[C]//高等学校建筑学专业教学指导分委员会建筑数字技术教学工作委员会.数智营造：2020 年全国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会论文集.华南理工大学建筑学院，华南理工大学建筑学院亚热带建筑科学国家重点实验室，2020.

[7]李端杰，王梦晗，王洁宁.基于应急避险行为模拟的城市公园边界空间优化：以济南市泉城公园为例[J].风景园林，2022，29(4)：114-120.

[8]刘梦萱，杨春侠，范兆祥.行为仿真的研究进展及综合分析框架：基于建筑学、城乡规划学视角[J].新建筑，2023(5)：113-119.

[9]公雅妮.城市综合交通体+数字化技术浅析：以重庆市沙坪坝站进站大厅空间人流拥堵分析基于 Massmotion 仿真模拟[C]//2020 中国建筑学会学术年会论文集.重庆大学建筑城规学院，2020.

[10]WANG J H，JIN B W，LI J，et al. Method for guiding crowd evacuation at exit：The buffer zone[J]. Safety Science，2019，118：88-95.

[11]徐思璐.基于行为仿真的滨水公共空间问题诊断和优化提升：以上海北外滩滨江公共空间为例[D].上海：同济大学，2020.

[12]杨莉.物理因素对建筑人员疏散的影响研究[D].上海：上海应用技术大学，2021.

[13]周曦，汤尧，张芳，等.中小学校人流仿真模拟与空间优化策略：基于 MassMotion 模型的设计探索[J].南方建筑，2025(9)：80-92.

[14]杨春侠，詹鸣，耿慧志，等.基于行为模拟的户外公共空间研究综述及滨水关键问题探索[J].西部人居环境学刊，2022，37(5)：89-97.

[15]王雷，张勃，郑则立，等.基于社会力模型的体育场馆人员疏散仿真研究[J].建筑学报，2022，(增刊 1)：239-245.

[16]公雅妮.城市综合交通体数字化技术浅析：以重庆市沙坪坝站进站大厅空间人流拥堵分析基于 Massmotion 仿真模拟[C]//中国建筑学会.2020 中国建筑学会学术年会论文集.重庆大学建筑城规学院，2020.

[17]杨熙，赵茜，郭建.基于 MassMotion 仿真的商业综合体入口层优化策略研究：以银泰创意城为例[J].华中建筑，2023，41(1)：58-63..