

# 景区客流量微观动态仿真建模与实现

杨柳青<sup>1</sup> 叶青<sup>2</sup> 马洪蕊<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(北京联合大学旅游学院 北京 100101)

<sup>2</sup>(北京工业大学经济管理学院 北京 100022)

<sup>3</sup>(防灾科技学院电子科学与控制工程学院 河北 三河 065201)

**摘要** 景区微观客流仿真,通过计算模拟手段,综合景区承载能力和客流量变化,对景区拥堵动态演进过程进行仿真,为相关管理策略决策和分析提供支持。基于离散时间方法提出景区微观客流量动态仿真模型。该模型针对景区游客个人行为建模,将景区的环境作为限制因素,用马尔可夫链的方式,将不同时刻景区的拥堵状态链接起来,形成整个动态演进过程。相比传统分析模型,该方法更加直观、对管理策略制定分析支持更好。通过客流变化对客流的影响仿真验证了模型的有效性,并对景区旅游设施改进和游客行为规范对拥堵的影响进行了仿真分析。

**关键词** 客流 仿真 拥堵 微观 景区

中图分类号 TP3 F59

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2023.02.011

## MODELING AND IMPLEMENTATION OF MICRO DYNAMIC SIMULATION OF TOURIST FLOW IN SCENIC SPOTS

Yang Liuqing<sup>1</sup> Ye Qing<sup>2</sup> Ma Hongrui<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(Tourism College, Beijing Union University, Beijing 100101, China)

<sup>2</sup>(School of Economics and Management, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

<sup>3</sup>(School of Electronic Science and Control Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China)

**Abstract** The dynamic evolution process of congestion in scenic spots was simulated by calculating and simulating the changes of the carrying capacity and passenger flow of scenic spots, so as to provide support for the decision-making and analysis of relevant management strategies. This paper proposed a micro dynamic simulation of tourist flow in scenic spots based on discrete time. The model aimed at modeling the individual behavior of tourists in the scenic spot, took the environment of the scenic spot as a limiting factor, and linked the congestion status of the scenic spot at different times in the way of Markov chain, forming the whole dynamic evolution process. Compared with the traditional analysis model, this method was more intuitive and supported the analysis of management strategy formulation better. The effectiveness of the mode was evaluated with simulation experiments derived by different visitor flows. And the impact of the infrastructure and visitor behavior on visitor traffic congestion were also analyzed with this model.

**Keywords** Visitor flow Simulation Congestion Micro Scenic spots

## 0 引言

随着旅游需求的旺盛,旅游基础设施建设不足的问题日益凸显,景区拥堵问题逐渐成为旅游业发展面

临的一个严峻的实际问题,甚至可能引发安全问题。当前景区大都采用实时播报入园人数和出园人数,向游客提示景区拥堵的情况,避免拥堵发生。然而,拥堵与游客行为和景区承载能力等多种因素有关,单纯的入园和出园人数难以准确地反映景区拥堵演进过程。

余向洋等<sup>[1]</sup>提出了基于最小二乘法的景区客流预测模型,但是没有办法对景区内微观客流动态演进进行分析。此外,由于景区拥堵过程的不可控性,很难基于实际的拥堵演进过程,对拥堵管理策略进行实时有效地分析评估,只能在实际拥堵发生时,观察相关措施的实际效果,存在分析成本高、实时性难以保证、效能不够高等不足。

计算机仿真是一个重要的现代科学实验替代手段。通过构建相应的仿真模型,利用计算机的计算能力,可以相对真实地模拟研究对象的动态演进过程和相关因素的影响,从而以较低的试验成本和较高的试验成效支持相关研究。

本文提出了一种针对景区微观客流动态演进分析的计算机仿真模型和具体的实现方法,用于对景区拥堵治理策略的分析和评估。该模型借鉴交通流量模型的构建思路,从景区游客个体行为的建模入手,考虑景区限制因素,构建景区微观客流仿真模型。模型利用离散时间仿真方法,基于马尔可夫链,将不同时刻的用户行为链接在一起,形成动态的拥堵过程演进变化过程。该模型能够为景区拥堵治理策略制定及其验证分析提供支持。本文的主要贡献在于:

1) 基于游客个体行为建模,考虑景区限制因素,提出了景区客流微观仿真模型。相对于简单的数值分析,该模型可以动态反映拥堵形成及其演进过程,从而更好地支持景区拥堵管理。

2) 基于马尔可夫链,利用离散时间仿真方法将不同时刻的游客行为状态进行连接,从而实现景区拥堵发展过程的动态演进模拟。

3) 实现了仿真模型原型系统,并基于计算机仿真系统开展了景区拥堵过程仿真实验。结果证明,仿真模型能够较好地完成仿真实验,并且实现效率在合理范围之内。

## 1 景区旅游仿真研究进展

计算机仿真技术已经在旅游规划和管理中得到了广泛的应用。文献[2-4]利用计算机技术开展了旅游路线的实时优化调度方面的研究。文献[5]基于仿真技术提出了景区路径规划方法,为景区建设提供指导。文献[6]则基于仿真技术开展了景区拥堵治理研究。文献[7]开展了游客交通出行的仿真研究。文献[8]给出了游客行为仿真模型。参考文献[9-10]给出了完整旅游系统的仿真模型。文献[11]给出了微

观交通流仿真。但目前还没有一个能够综合考虑景区承载能力和游客客流能交互动态演进的仿真模型。

## 2 景区微观客流仿真模型构建

### 2.1 基于跟驰模型的景区游客行为仿真

当景区游客数量较少时,游客之间的距离可以保持在足够大的范围,游客之间相互不干扰,将会保持一个较为舒适速度游览景区。当景区游客数量不断增加时,游客之间距离小到一定程度时,游客的游览速度可能会受到干扰。在不考虑景区驻留时间时,游客的游览速度决定于游客之间的距离。景区驻留时间不影响客流流动,因此,本文暂不考虑游客驻留时间因素。

游客间不受干扰的距离可以参考公众距离<sup>[12]</sup>。公众距离是彼此互不熟识的人之间的距离。根据统计分析,人类社会的公众距离一般为3.6 m-7.5 m。考虑景区客流是大空间行进中的相互干扰,我们在仿真模型构建中,选取上限7.5 m作为最大公众距离。当游客间距离大于7.5 m时,相互不干扰。

当游客间距小于公众距离,即7.5 m时,游客之间开始相互干扰。基于交通流的跟驰模型<sup>[13]</sup>,可以得到游客之间相互影响的行为模型,如式(1)所示。

$$\begin{cases} \ddot{x}_n = \alpha(V(\Delta x_n) - \dot{x}_n) & \Delta x_n < 7.5 \\ \ddot{x}_n = 0 & \Delta x_n > 7.5 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\ddot{x}_n$ 表示游客 $n$ 行进过程中的加速度。游客 $n$ 通过加速度,根据游客间的距离调整自己的行进速度,以确保游客之间能够有一个合适的公众距离。一般来说游客间距离小于公众距离下限,即小于3.6 m时,游客开始感到压迫,拥堵开始出现,当大多数游客间距都小于3.6 m时,拥堵已经比较明显。 $V$ 表示存在干扰时游客调整后的行进速度函数,决定于游客之间的间距 $\Delta x_n$ 。不同的游客间距离 $\Delta x_n$ ,游客会有不同的行进速度,以尽可能保持充分的公众距离。 $\dot{x}_n$ 是游客 $n$ 的行进速度。 $\alpha$ 表示游客对公众距离变化的敏感程度。

式(1)表示,当游客间距离大于最大公众距离7.5 m时,游客之间相互不影响,游客行进速度调整为0。当游客间距离小于7.5 m时,游客之间相互不干扰,所有游客都以自然人舒适行进速度行进。

### 2.2 基于离散时间仿真的动态仿真方法

本文采用离散时间的仿真方法模拟仿真对象状态在不同时刻的动态演进过程。仿真对象的状态随着时间进行变化。仿真对象的状态更新可以看成为一个马尔可夫过程,即对象的状态仅仅取决于前一个时刻的

状态和既定的状态变换规则。仿真过程中,假定仿真对象的状态在一个时间片内完成状态更新。状态更新按照状态变化规则完成。仿真过程不再具体计算某一仿真目标的具体数值,而是通过蒙特卡洛仿真的方法,通过对仿真对象状态进行统计得到。相对数值模拟,该方法具有仿真建模直观的特点。不同时刻的时间片相互叠加即可模拟整个仿真对象状态信息在仿真时间段内的动态演进过程。

### 2.3 景区微观客流动态仿真模型构建

本文结合游客行为模型和离散时间仿真方法构建景区微观客流动态仿真模型。简单起见,仿真模型只考虑了游客前后之间的影响,左右游客之间的影响也可能改变游客调整游客间距的快慢。游客左右距离的影响可以通过  $\alpha$ , 即游客对公众距离变化的敏感程度模拟。

客流模型为景区道路上行进的一个个游客在行进过程中相互影响的过程。当游客数量增加,游客之间距离过小,游客之间开始相互影响,游客开始调整行进速度,以避免距离过小,产生压迫感。当距离无法调整时,拥堵就开始发生了。游客的景区行为可以用一个状态集合表示。状态集合包括 5 个基本状态信息,具体如式(2)所示。

$$Visitor\_n = \{T, x_n, \dot{x}_n, \ddot{x}_n, \Delta x_n, a_n\} \quad (2)$$

式中:  $Visitor\_n$  表示游客  $n$ , 包括 6 个状态信息:  $T$  表示游客的类型, 是老年、中年、青年、小孩、男性、女性等;  $x_n$  表示某一特定时刻, 游客  $n$  的位置;  $\dot{x}_n$ 、 $\ddot{x}_n$ 、 $\Delta x_n$ 、 $a_n$  与式(1)的定义一致, 分别表示游客  $n$  在某一特定时刻的行进速度、行进速度变化加速度、游客间距离和该游客对公众距离变化的敏感系数。除  $T$  之外, 其他 5 个为游客行为状态信息。

客流是游客行为与景区道路相互作用的结果。景区道路也可以用一个状态集合表示。景区道路的状态集合包括 3 个元素, 具体表示如下:

$$Path = \{L, Comfortable_v, Site\} \quad (3)$$

式中:  $L$  为景区道路的长度;  $Comfortable_v$  表示景的舒适游览速度。景区设施的改善可能会改变  $Comfortable_v$ , 比如, 引入电瓶车、索道等设施, 游客可以以更快的舒适速度游览景区。  $Site$  为景区的景点分布集合, 每一个元素包括景点类型和景点位置。

由游客行为模型和我们可以得到游客行为状态信息的变化规则。设定游客行为状态信息更新时间间隔为  $\Delta t$ ,  $t$  时刻游客状态信息已经确定为:  $\{x_n(t), \dot{x}_n(t), \ddot{x}_n(t), \Delta x_n(t), a_n(t)\}$ 。当  $\Delta x_n(t)$  小于 7.5 m 时, 下

一个仿真时刻  $t' = t + \Delta t$  时刻的状态更新规则为:

$$\begin{cases} x_n(t') = x_n(t) + \dot{x}_n(t) \Delta t \\ \dot{x}_n(t') = \dot{x}_n(t) + \ddot{x}_n(t) \Delta t \\ \ddot{x}_n(t') = \alpha(t) (V(\Delta x_n(t)) - \dot{x}_n(t)) \\ \Delta x_n(t') = x_{n-1}(t + \Delta t) - x_n(t + \Delta t) \\ \alpha_n(t') = \varphi(\alpha_n(t), d) \end{cases} \quad (4)$$

当  $\Delta x_n(t)$  大于 7.5 m 时, 游客行为状态更新规则为:

$$\begin{cases} x_n(t') = x_n(t) + \dot{x}_n(t) \Delta t \\ \dot{x}_n(t') = \dot{x}_n(t) \\ \ddot{x}_n(t') = 0 \\ \Delta x_n(t') = x_{n-1}(t + \Delta t) - x_n(t + \Delta t) \\ \alpha_n(t') = \varphi(\alpha_n(t), d) \end{cases} \quad (5)$$

游客 5 个行为状态信息的更新规则解释如下:  $t'$  时刻, 游客  $n$  的位置为,  $t$  时刻的位置加上  $t$  时刻的速度与时间片  $\Delta t$  的乘积; 当游客间距离小于公众距离上限 7.5 m 时, 游客  $n$  的速度为  $t$  时刻的速度加上  $t$  时刻的加速度与时间片  $\Delta t$  的乘积, 当游客间距离大于公众距离上限 7.5 m 时, 游客  $n$  的速度保持  $t$  时刻的速度不变; 当游客间距离小于公众距离上限 7.5 m 时, 游客  $n$  的加速度, 由式(1)确定, 当游客间距离大于公众距离上限 7.5 m 时, 游客  $n$  的加速度为 0; 游客  $n$  的游客间距离为前面游客的位置与自己的位置的差; 敏感系数在  $t$  时刻敏感系数的基础上, 根据当前的拥堵程度, 进行调整, 函数  $\varphi(\cdot)$  为敏感系数调整函数。

根据式(4)和式(5)定义的状态更新规则可以得到下一时刻游客的行为状态信息。对仿真客流对象中, 每一个游客都完成游客行为状态信息后, 仿真系统就进入新的仿真时刻。以新的仿真时刻状态信息为基础, 利用状态更新规则, 可以得到更下一刻游客的行为状态信息。不同时刻, 游客的行为状态信息链接在一起, 就构成了游客行为随时间的动态演进过程。仿真系统可以通过游客行为状态信息变化, 推导出观察变量的动态演进过程。

## 3 仿真系统设计与实现

### 3.1 客流仿真系统框架

客流仿真系统架构如图 1 所示。客流用一个链表结构表示。链表中的每一个元素表示一个游客。游客模型包括式(2)定义的 5 个游客行为状态信息, 和一个用于构建链表机构的指针。链表表头指针  $V\_flow\_$

Ptr 用于链表的遍历和状态更新操作。

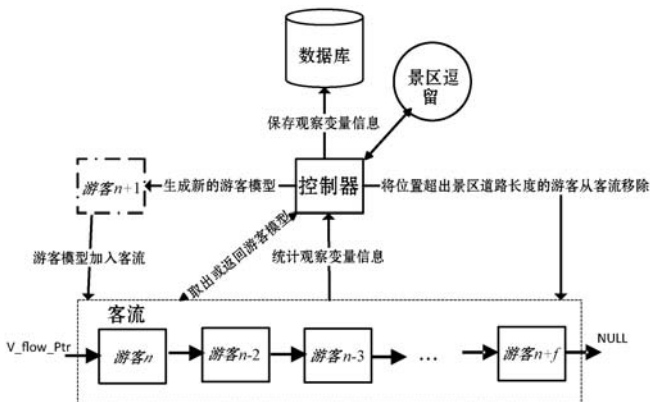


图1 客流仿真系统架构

每隔一个仿真时间片  $\Delta t$ , 控制器判断是否需要产生一个游客模型。如果需要产生, 则生成一个游客模型, 并完成初始化, 然后通过链表表头指针  $V\_flow\_Ptr$ , 将游客模型加入客流链表。完成链表维护后, 开始链表状态信息更新, 利用当前各个游客模型的状态信息和式(4)和式(5)定义的状态更新规则, 遍历链表, 更新所有游客模型的行为状态信息, 得到  $t'$  时刻的游客的状态。若更新后的游客位置超出了景区路径的长度, 则将游客模型从链表中去除, 表示游客已经离开景区。

控制器还在遍历客流链表的同时, 统计观察变量的值, 并将观察到的值, 存储到数据库中。本文利用较为轻量简便的 Excel 作为仿真结果保存数据库。

### 3.2 游客进入景区和景点驻留的仿真实现

控制器判断是否须要生成一个新的游客模型的依据是, 是否有新的游客进入景区。游客进入景区的过程是一个随机过程。根据排队理论, 此类随机过程是一个典型的泊松分布, 即游客进入景区的时间服从指数分布  $\lambda e^{-\lambda x}$ , 期望为  $1/\lambda$ 。具体实现过程为: 由指数分布生成一个随机时间, 作为游客进入景区的时间。在仿真时间片更新时, 对比随机时间和当前的仿真时间, 如果随机时间小于仿真时间, 则生成新的游客模型, 加入队列, 表示游客进入景区。

在更新游客模型状态信息的过程中, 对于每一个游客模型, 看其是否经过一个景点, 如果经过景点, 则按照景点对游客类型的吸引力, 以一定概率将游客模型从链表取出, 保存在景区逗留库中。然后, 从景区逗留库中, 选取逗留时间最长的游客模型, 以一定概率返回链表。返回的行为状态与取出时相同。景点驻留时间可以通过 Pow-Law 分布式实现, 少数的景点吸引了大多数的游客, 而大多数的景点吸引了较少的游客, 即

所谓的“扎堆”现象。这在实际的景区景点统计中也是比较常见的。

### 3.3 游客对公众距离变化的敏感程度的模拟

不同的游客对公众距离变化的敏感程度不同, 并且与所处的环境也有很大关系。本文首先根据大数定理, 将不同游客自身对公众距离变化的敏感程度用一个服从正态分布的随机变量表示, 即  $a_n \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。在控制器生成游客模型时, 通过该正态分布, 为游客生成一个敏感系数。在仿真过程中可以动态调整敏感系数, 以反映游客所处环境的变化。一般说来, 当游客所处环境越拥挤时, 游客的敏感程度会增加, 当游客所处环境宽松时, 其敏感程度为降低。因此, 在仿真过程中, 当一段路段内游客数量超过一定阈值时, 以一定概率调整敏感系数, 具体概率可以作为仿真参数, 在仿真实验中进行设定。

借鉴跟驰模型, 存在干扰时游客行进速度调整函数  $V(\cdot)$  可以用一个单调有界的非负函数实现。一般而言, 游客间距大于 7.5 m 时, 游客都以舒适速度行进。步行而言, 人类的行进速度为 3.6 km/h<sup>[14]</sup>。如果景区增加旅游设施, 如电瓶车、缆车等, 这个速度可能会进一步增加。当游客间距小于 7.5 m 时, 游客会放慢速度, 以尽可能保持充分的公众距离。因此, 与跟驰模型一样, 本文选定双曲正切函数  $\tanh(\cdot)$  作为函数  $V(\cdot)$ ,  $V(\Delta x) = Comfortable_v \times \tanh(\Delta x/7.5)$ 。  $\Delta x$  和  $Comfortable_v$  定义同前。

## 4 景区拥堵仿真实验分析

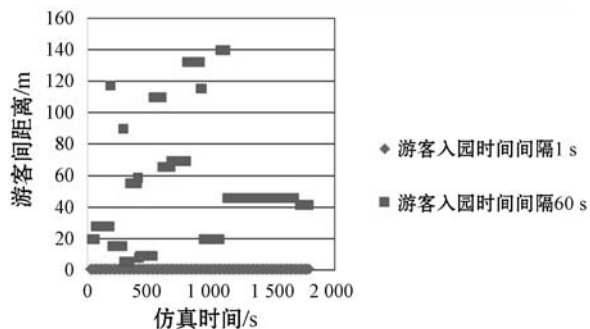
本文实现了景区客流动态仿真系统, 并基于该系统开展仿真验证实验。具体实验平台为: 联想 Thinkpad T450S、Windows 7 操作系统, Visual Studio 2017 编译环境。本文首先通过实测数据对比验证了模型的有效性; 其次, 验证了景区交通设施改进对拥堵的影响; 最后, 验证了景区景点分布对拥堵的影响。

### 4.1 仿真模型有效性验证

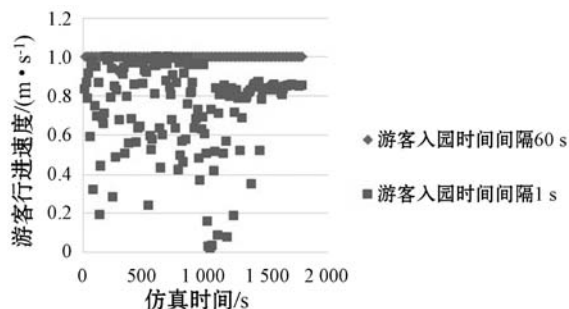
本文通过构建一个小型的街心公园的仿真模型(小型景点便于连续搜集观察数据), 并通过仿真数据与日常观察数据的对比, 对仿真模型的有效性进行验证。我们选定一个街心公园为样本, 构建仿真模型。景区道路长度  $L = 2\ 000$  m, 连接各景点的不同道路合成为一条道路, 游客对公众距离变化的敏感系数生成随机函数的期望为 0.7, 道路以步行为主, 因此, 舒适

速度设定为 1 m/s,即 3.6 km/h(人类平均步行速度的统计数据),离散时间仿真步长  $\Delta t = 0.001$  s,即微秒级,仿真时间为 1 800 s。

模型通过模拟不同入园流量下的景区拥堵情况变化验证模型的有效性。根据观察统计数据,夏季周末晚上为入园高峰期,平均值每分钟 60 人,对应平均入园时间间隔为 1 s。春秋季节周末上下午时间为正常入园流量,平均为每分钟入园 1 人,对应平均入园时间间隔为 60 s。仿真以平均入园时间间隔为期望,以指数分布模拟游客入园。仿真结果如图 2 所示。仿真结果为 1 400 次仿真实验的平均值。



(a) 客流变化下的游客间距分布



(b) 客流变化下的游客行进速度分布

图 2 模型有效性验证仿真结果

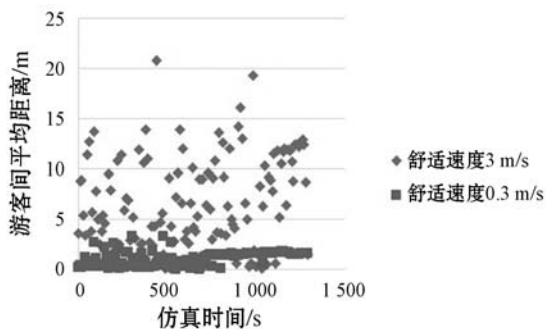
由图 2(a) 可以看到,在入园游客时间间隔为 60 s 时,游客间距离呈现随机分布,但是大都维持在 7.5 m 以上,游客间相互影响不大,园内拥堵情况不明显。随着游客入园时间间隔的逐渐缩短,园内游客间距离逐渐缩短,当游客入园时间间隔为 1 s 时,游客间距离主要集中在 2 m 左右,小于 7.5 m,游客之间开始相互影响,拥堵现象开始明显显现。仿真结果与实测数据情况接近。

游客行进速度分布由图 2(b) 显示。可以看到,在游客入园时间间隔为 60 s 时,大多数游客都维持在舒适的行进速度,即 1 m/s 左右。当游客入园时间间隔为 1 s 时,游客行进速度开始出现明显的随机化降低。客流量开始出现不稳定现象,拥堵迹象逐步明显。这与实际情况接近,夏季节假日晚上,公园内游客间相互

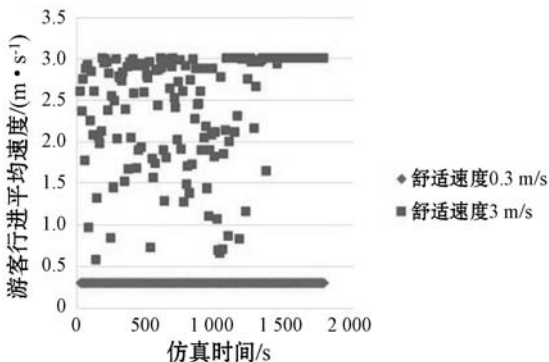
影响增加。

## 4.2 景区设施优化对拥堵的影响仿真

一些景区,通过引入一些设施,提高游客体验,如建设缆车、提供游览电瓶车等服务。这些设施客观上提高了游客的舒适游览速度。考虑香山八大处等景区,缆车一般为 18 min 单程,步行登山大约 180 min。从索道起点到山顶大约在 2 000 m。分别设定两次仿真实验的舒适游览速度分别为 0.3 m/s(模拟山地步行速度)和 3 m/s(模拟缆车)。仿真结果如图 3 所示。游客平均入园时间间隔为 10 s。



(a) 不同舒适游览速度下的游客间距分布



(b) 不同舒适游览速度下的游客行进速度分布

图 3 景区设施优化仿真结果

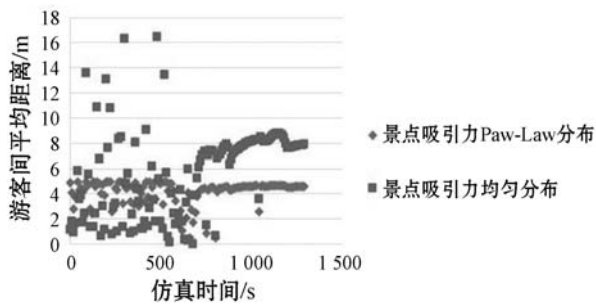
图 3(a) 显示,在舒适速度为 0.3 m/s 时,游客间距离集中于一个较小的取值范围,景区拥堵现象开始明显。随着舒适速度逐步增加到 3 m/s 时,游客间距离又开始在一个较大取值范围内分布,拥堵现象明显缓解。图 3(b) 显示,当舒适游览速度增加时,游客的行进总体速度明显增加。不同于客流量对拥堵的影响,舒适游览速度提升虽然缓解了拥堵,但是游客行进速度分布却更加随机。

图 3 的仿真结果说明,电瓶车、缆车、索道等设施的引入,不仅能增加游客游览的舒适程度,而且能够有效地缓解景区的拥堵,增加景区游客的承载能力。

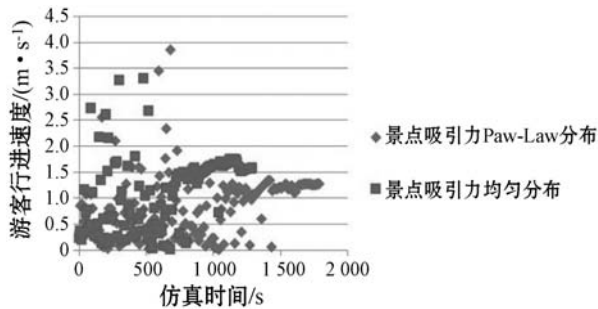
## 4.3 景点分布对拥堵过程的影响仿真

本文继续扩大景区仿真规模,分析景点分布变化

对景区拥堵过程的影响。设定景区为一个大型景区,景区道路长度为 100 km,包含 100 个景点。分别采用均匀分布和 Pow-Law 分布模拟景点吸引力,即游客在景点的驻留时间分布。在两种分布情况下,游客的平均景点驻留时间相同。景点的空间分布,即在道路上的位置,均采用随机正态分布。通过对比两个场景下的仿真结果,分析景区景点分布对拥堵过程的影响。考虑大型景区,游客游览速度为步行和非步行混合,设定游览速度为以 5 m/s 为期望的正态分布。游客平均入园时间间隔为 10 s。仿真结果如图 4 所示。



(a) 不同景点吸引力分布下的游客间距分布



(b) 不同景点吸引力分布下的游客行进速度分布

图4 景点吸引力分布变化仿真结果

根据图4,在仿真开始阶段,两种景点吸引力分布差不多,但是随着仿真过程不断推进,随机分布的拥堵过程明显好于 Pow-Law 分布。随机分布情况下,游客间平均距离逐渐收缩到 7.5 m 以上,平均行进速度也逐渐开始向舒适行进速度靠拢。仿真结果说明合理分布景区的景点能够有效缓解景区内拥堵。

## 5 结语

本文提出了一个景区微观客流动态仿真模型:基于跟驰模型,对构成景区客流的游客个体行为建模;通过叠加游客个体行为模型,构建整体的景区客流仿真模型;采用离散时间仿真的方法构建整体客流随时间动态演进的过程。该模型具有物理含义直观,能考虑更多随机细节等特点,能够为景区客流拥堵管理提供更为有效的分析验证支持。本文通过客流变化仿真验

证了仿真模型的有效性,并对景区设施改进和游客行为规范对拥堵的影响进行了仿真分析。

本文在一些细节行为模拟方面进行了简化,如景区景点的分布、景区路网结构、左右平行方向的游客行为干扰等。在后续的工作中,我们将继续就这些问题,不断完善仿真模型,并基于大规模景区观察数据,校准模型关键参数。

## 参考文献

- [1] 余向洋,胡善风,朱国兴,等. 基于 LS-SVM 方法的景区客流中期预测研究[J]. 旅游学刊,2013,28(4):75-82.
- [2] 张笑白,秦志学. 高峰期内旅游路线实时优化调度仿真研究[J]. 计算机仿真,2017,34(5):243-246.
- [3] 陆青,梁昌勇,黄永青,等. 面向旅游行程规划的交互式多智能体遗传算法[J]. 计算机应用研究,2008,25(11):3311-3313.
- [4] 方苏杰,张宇航,方成刚. 基于旅行费用约束的景点及路径动态规划研究[J]. 计算机应用与软件,2018,35(12):329-333.
- [5] 胡军国,祁亨年,董峰,等. 一种改进蚁群算法研究和旅游景区路径规划问题求解[J]. 计算机应用研究,2011,28(5):1647-1650.
- [6] 储玖琳,张佩云,陈亚伟. 旅游景区游客拥堵疏散路径规划仿真[J]. 计算机仿真,2018,35(4):80-83,426.
- [7] 黄霞,张高煜,杨小铎. 构建游客出行规律的 NetLogo 交通仿真模型[J]. 微型电脑应用,2019,35(4):38-41,44.
- [8] 黎燮. 基于 Agent 的景区游客行为仿真建模与应用——以颐和园为例[J]. 旅游学刊,2014,28(11):62-72.
- [9] 魏娜娜,段再超,魏占杰. 基于 Unity3D 的白洋淀文化旅游仿真系统研究[J]. 计算机仿真,2019,36(9):365-370.
- [10] 杨秀平,翁钢民,侯玉君,等. 基于 SD 模型的多情景城市旅游环境承载潜力建模与仿真——以兰州市为例[J]. 经济地理,2018,38(3):208-216.
- [11] 马生涛,余雷,杨杰,等. 基于 Anylogic 的道路交通堵塞仿真研究[J]. 计算机应用与软件,2017,34(12):111-115.
- [12] 百度百科. 公众距离[EB/OL]. [2022-11-28]. [https://baike.baidu.com/item/%E5%85%AC%E4%BC%97%E8%B7%9D%E7%A6%BB?fromModule=lemma\\_search-box](https://baike.baidu.com/item/%E5%85%AC%E4%BC%97%E8%B7%9D%E7%A6%BB?fromModule=lemma_search-box).
- [13] Bando M, Hasebe K, Nakayama A, et al. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation [J]. Physical Review (S1063-651X), 1995, 51(2): 1035-1042.
- [14] 百度知道. 成年人步行时速是多少?[EB/OL]. [2022-11-28]. <https://zhidao.baidu.com/question/2080521997288091508.html>.