

# 基于仿真优化的超大城市内涝场景交通疏导 优先级评估

朱玉寒<sup>1</sup>, 邓兴栋<sup>2,3</sup>, 狄德仕<sup>2,3</sup>, 李冠耀<sup>2,3</sup>, 李政<sup>1</sup>, 田野<sup>1</sup>

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 广州市城市规划勘测设计研究院创新中心, 广州 510060;

3. 广州市资源规划和海洋科技协同创新中心, 广州 510060)

**摘要:** 针对现有研究对动态交通系统刻画精度低、忽视内涝点位间相互作用等不足, 提出一种基于仿真优化的城市内涝疏导优先级评估方法。以最大化路网用户平均行程时间为目标, 以内涝路段为决策变量构建 0-1 规划问题; 将疏导优先级评估转化为离散优化问题, 通过搜索疏导点位组合刻画点位间相互作用。采用中观交通仿真软件 DynusT 进行路网精细化建模, 并利用快速机器学习模型作为代理, 实现仿真优化闭环算法, 求解路段疏导优先级。最后, 以广州市中心城区为例构建仿真模型并进行验证。结果表明, 按优先级排序治理后, 路网用户平均行程速度较现有方案提升 28.72%, 验证了方法的准确性。

**关键词:** 仿真优化; 城市交通; 交通仿真

**中图分类号:** U491.5; U495

**文献标志码:** A

## Simulation-based Optimization for Priority Assessment of Traffic Dredging in Megacity Waterlogging Sections

ZHU Yuhan<sup>1</sup>, DENG Xingdong<sup>2,3</sup>, DI Deshi<sup>2,3</sup>,  
LI Guanyao<sup>2,3</sup>, LI Zheng<sup>1</sup>, TIAN Ye<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Innovation Center, Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China; 3. Guangzhou Collaborative Innovation Center for Resource Planning and Marine Science & Technology, Guangzhou 510060, China)

**Abstract:** Addressing the limitations of existing research, such as low precision in depicting dynamic

traffic systems and insufficient consideration of interactions between flood points, this study presents a simulation-based optimization method for assessing urban flood mitigation priorities. By maximizing the average travel time of road network users as the objective and using flood-affected road sections as decision variables, a 0-1 programming problem is formulated to transform the priority assessment into a discrete optimization problem. The interactions between flood points are captured through the search for optimal mitigation point combinations. A mesoscopic traffic simulation tool, DynusT, is employed for detailed road network modeling, and a fast machine learning model is utilized as a surrogate to enable a closed-loop simulation optimization algorithm for determining mitigation priorities. The method is validated through a case study in the central urban area of Guangzhou. Results demonstrate that implementing mitigation measures based on the priority ranking improve the average travel speed by 28.72% compared to existing solutions, confirming the accuracy of the method.

**Keywords:** simulation-based optimization; urban transportation; traffic simulation

在严峻的内涝形势下, 我国内涝防治能力严重不足<sup>[1-3]</sup>。目前我国城市交通系统内涝防治主要分为 2 类: 日常路段的修缮治理与内涝场景下的紧急疏导<sup>[4]</sup>。前者通过历史数据评估内涝点位, 后者在内涝发生后分析关键点位以进行疏导。城市内涝治理

收稿日期: 2023-09-08

基金项目: 国家杰出青年科学基金(52125208); 城市公共交通智能化交通运输行业重点实验室开放课题(202001); 国家自然科学基金面上项目(52072129); 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室基金(2020B121202019); 广州市资源规划和海洋科技协同创新中心项目(2023B04J0301, 2023B04J0046); 科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目(2022ZD0115600)

第一作者: 朱玉寒, 博士生, 主要研究方向为中观交通仿真、代理优化。E-mail: zhuyuhan@tongji.edu.cn

通信作者: 邓兴栋, 教授级高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为城市与交通规划、交通数字治理。

E-mail: dxd1005@163.com



论文  
拓展  
介绍

的本质是一定资源总量限制下的最优化资源分配问题,需精确评估内涝点位交通路网风险排序,以实现最优分配。

国内外学者对城市内涝的风险评估问题展开了大量研究。早期多采用仿真方法模拟洪涝灾害,评估内涝影响与风险。Yin等<sup>[5]</sup>和Li等<sup>[6]</sup>分别采用水动力深度测量与地理系统洪水模拟技术,定量评估洪涝对城市路网的物理破坏程度。此类基于水文-水动力模型的物理模拟复杂度高,对数据数量与质量要求严格,且忽视了城市交通系统的影响,难以有效指导治理与应急疏导。Su等<sup>[7]</sup>通过构建微观交通仿真模型,首次实现城市内涝与交通拥堵的动态耦合模拟,但因优化问题的非线性和计算成本高昂,研究仅局限在微观交通仿真层面。

近些年相关研究倾向于解析方法,通过数学公式推导获取精确且可解释性强的解,如徐艺扬等<sup>[8]</sup>通过多元回归模型实现内涝因子量化筛选,Sun等<sup>[9]</sup>运用因子分析法建立风险等级评价框架,程朋根等<sup>[10]</sup>基于层次分析法绘制城市内涝灾害风险分布图。基于地理信息系统(GIS)技术的空间分析方法也可用于内涝影响机理研究,如:罗日洪等<sup>[11]</sup>基于GIS多因素加权叠加技术完成内涝风险区识别,Wang等<sup>[12]</sup>进一步集成水文模型与GIS空间分析提升区域风险评估精度。然而,上述方法未充分纳入交通系统要素,研究结果难以指导实时交通应急疏导。此外,内涝点位对路网的影响机制复杂,非线性叠加效应显著,如多个点位内涝时路网行程时间增加量可能显著偏离单点内涝之和。这种非线性叠加效应即为内涝点位间的相互作用,但现有方法尚未对此深入探讨。

目前有研究采用神经网络、机器学习等智能算法求解内涝评估问题,如:Shu等<sup>[13]</sup>设计多地理单元卷积神经网络模型,实现内涝风险空间特征的自动提取;Guo等<sup>[14]</sup>开发基于遗传算法的自动机器学习框架,构建风险预警响应系统等。这些算法能够自动化处理大量数据并减少计算成本,但对数据质量和数量要求高,且存在可解释性差、不确定性高等问题。

基于以上文献综述,目前在城市内涝治理领域的研究中还存在以下空白:①内涝场景下大规模、动态的城市交通系统精准刻画能力弱;②忽视内涝点位间相互作用,导致评估结果的指导作用有限;③主流解析方法对数据依赖性较强,方法不确定性与局限性较大;④主流仿真方法的求解计算成本高昂,难以

以开展大规模研究。

为此,提出了一种基于仿真优化的超大城市路网内涝风险评估及疏导优先级排序方法。为了降低计算成本,引入代理模型构建仿真优化(SBO)框架,以仿真输出作为优化算法的适应值指导寻优。该方法能够模拟复杂系统运行机理,规避现实实验风险,并支持决策分析与预测。在交通领域中SBO方法多应用于交通需求和供给优化,如信号灯时序优化<sup>[15]</sup>、公交时刻表优化<sup>[16]</sup>、充电站位置布设<sup>[17]</sup>等。目前SBO方法虽在国外应用较为成熟,但国内推广缓慢且应用多停留在微观交通仿真层面<sup>[18-19]</sup>,尚未应用于超大城市规模的动态交通运行评估问题。

本文采用DynusT中观交通仿真软件对超大城市路网建模,基于多种快速机器学习模型构建仿真代理模型<sup>[20]</sup>,并利用代理辅助进化算法求解非线性问题。通过优化求解不同内涝路段组合下的路网运行状态,将内涝点位间相互作用纳入考量。求解得到各场景下对路网影响最大的路段组合后,采用统计与聚类折算方法确定内涝点位疏导优先级排序。最后,以广州市中心城区为实验对象,证明了方法的有效性。以布设可变信息交通标志牌(VMS)为例对该方法进行验证。结果表明,该方法可显著提高投入产出效益。

## 1 问题分析与建模

### 1.1 问题分析

为实际工程制定防涝策略时,内涝点位风险的相对大小(即疏导优先级排序)更具指导意义。当前内涝风险评估方法主要关注地形地貌、排水设施、道路线型等静态“单点”属性,忽略了内涝点位间相互作用及城市交通系统的动态特性,导致评估存在较大局限性。

将内涝风险评估转化为数学优化问题,通过明确目标函数和约束条件搜索最优解,提升决策的科学性与准确性。采用中观交通仿真模型,精确刻画内涝场景下超大规模路网的动态交通运行状态及内涝点位间的相互作用。整合历史内涝数据与未来内涝场景模拟结果,全面识别城市内涝风险特征。

### 1.2 问题界定

鉴于路网脆弱性,内涝点位组合对交通影响越大,风险就越高,因此以所有用户平均行程时间最大为优化目标。将水务局评估所得的内涝风险点位信息作为模型输入,以可能受内涝影响的路段作为决

策变量,以治理资源总量限制作为约束条件,建立0-1规划离散优化模型。

### 1.3 数学模型

目标函数为

$$\max f(X) = \frac{1}{d} \sum_{r \in R} T(X, CB_r) = \frac{1}{d} \sum_{r \in R} T \left( X, \sum_{w=1}^g c_{a_w} a_{rw} + \sum_{v=1}^h (1-\rho) c_{b_v} b_{rv} \right) \quad (1)$$

决策变量为

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (2)$$

资源平衡约束为

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = m, x_n \in \{0, 1\} \quad (3)$$

式(1)~(3)中符号见表1。式(1)表示目标函数为所有用户的最大平均行程时间;式(2)表示决策变量为路网可能内涝路段构成的 $n$ 维0-1变量;式(3)表示约束条件为实际投入治理的资源总量,本文中用可疏导的内涝路段数量表示。

表1 数学模型符号表示

Tab.1 Symbolic representation of mathematical models

符号	含义
$n$	路网内受内涝影响路段总数
$m, m \in [1, n]$ 且 $m \in Z^*$	实际投入治理资源总量(表示能够治理的路段数量)
$i, i \in [1, n]$ 且 $i \in Z^*$	路网内实际受内涝路段数
$x_i$	路网内第 $i$ 个受内涝路段
$Z^*$	路网内受内涝影响路段集合
$d$	路网出行用户总数
$a, A$	未内涝路段及所有未内涝路段集合
$b, B$	内涝路段及所有内涝路段集合
$r, R$	路网出行用户及所有出行用户集合
$c, C$	路段通行能力及路段通行能力集合
$c_n$	路网内路段 $n$ 的通行能力
$g, g \in [0, i]$ 且 $g \in Z^*$	某一用户行程中内涝路段集合上限值
$h, h \in [0, i]$ 且 $h \in Z^*$	某一用户行程中未内涝路段集合上限值
$\rho, \rho \in [0, 1]$	内涝路段通行能力折减系数
$B_r = \{a_{r1}, a_{r2}, \dots, a_{rg}, b_{r1}, b_{r2}, \dots, b_{rh}\}, a_{rg} \in A, b_{rh} \in B$	第 $r$ 个用户行程路段集合
$f(X)$	路网所有用户平均行程时间
$T(X, CB_r)$	在内涝场景 $X$ 下用户 $r$ 行驶一定通行能力的路段集合所需要的行程时间

## 2 仿真优化算法

### 2.1 算法框架

代理模型的选择是仿真优化算法的核心。理想的代理模型应提供预测值及不确定度,指导最优解评选。为了节约计算资源,采用机器学习模型作为

代理,针对其难以输出预测误差的问题,受文献[20-21]启发,使用刀切法实现不确定性测量。

将优先级评估问题转化为优化问题,以内涝路段集合为决策变量、治理资源总量为约束条件、路网总行程时间最大化为优化目标。通过采样生成初始解集,经仿真评估构建仿真样本集(SSD)。选择最优超参数组合训练机器学习模型以估计目标函数值,利用刀切法预测误差,并将结果输入改进期望准则以寻找最大价值采样点。将最优采样点代入仿真模型,验证并更新仿真样本集。根据路网规模、计算成本及收敛情况设置迭代上限,迭代至输出最终结果<sup>[21]</sup>。

### 2.2 初始采样方法

研究区域内涝场景下受影响的路段总数为 $n$ ,即对应解空间维度为 $n$ 。高维空间中简单随机抽样易导致样本分布不均匀,出现数据聚集问题。因此,采用拉丁超立方采样(LHS)对每个样本分层随机化,避免数据聚集<sup>[22]</sup>。

依据式(3)资源平衡约束,均匀采样并得到初始样本解集 $\alpha = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_p\}$ 。利用式(1)求得每个初始样本解 $\gamma_p$ 的目标函数值 $y_{\gamma_p}$ ,建立仿真样本集

$$D_{SSD} = \{(\gamma_1, y_{\gamma_1}), (\gamma_2, y_{\gamma_2}), \dots, (\gamma_p, y_{\gamma_p})\} \quad (4)$$

### 2.3 代理模型

针对超大规模路网内涝风险评估问题,采用快速机器学习模型作为代理,通过学习样本数据预测仿真模型输出,以提高计算效率并降低成本<sup>[21]</sup>。研究选取了 $K$ 阶最近邻(KNN)、随机森林(RF)、极端梯度提升(XGB)、支持向量回归(SVR)和轻度梯度提升机(LGBM)5种快速机器学习模型,超参数取值范围见表2。

确定模型超参数取值范围后,采用网格搜索遍历所有可能的超参数组合,并通过 $K$ 折交叉验证评估模型性能,最终选择性能最优的超参数组合。

### 2.4 代理模型辅助的进化算法

超大规模城市路网的解空间极大,且仿真模型具有非线性和高复杂度,为了避免陷入局部最优解,选用全局搜索能力强的多种群遗传算法(MPGA)进行求解。将种群分为多个子群独立进化,增强全局搜索能力,降低局部最优风险,改善收敛性。确定进化算法后,采用代理模型辅助进化算法(SASE),结合代理模型与进化算法,加速收敛速度并提升算法性能。

### 2.5 改进期望准则

代理模型的预测精度有限,优化过程中需谨慎

表2 代理模型及超参数取值范围

Tab.2 Surrogate model and hyperparameter values

代理模型	模型超参数	超参数默认值	超参数取值范围
KNN	n neighbors	5	{2, 5, 10}
	leaf size	30	{10, 30, 60}
	metric	minkowski	{minkowski, manhattan, euclidean}
RF	n estimators	100	{100, 200, 300}
	n estimators	100	{100, 200, 300}
XGB	max depth	10	{10, 15, 20}
	learning rate	0.1	{0.01, 0.1, 0.2}
SVR	kernel function	rbf	{linear, poly, rbf, sigmoid, precomputed}
LGBM	learning rate	0.1	{0.000 01, 0.000 1, 0.01, 0.1, 0.2, 0.3}

选择最优解。在评估采样适应性时,除函数值外,还应考量采样点不确定度,以增强算法跳出局部最优的能力。采用改进期望准则(EI)作为优化解集的综合评价指标<sup>[23]</sup>,通过计算采样点优于当前最优解的期望值评估适应性,计算式为

$$EI(Z) = (\hat{\omega}(Z) - t_{\max}) \varphi \left( \frac{\hat{\omega}(Z) - t_{\max}}{\hat{s}(Z)} \right) + \hat{s}(Z) \varphi \left( \frac{\hat{\omega}(Z) - t_{\max}}{\hat{s}(Z)} \right) \quad (5)$$

式中: $Z$ 表示自变量; $\hat{\omega}(Z)$ 表示代理模型的预测值; $\hat{s}(Z)$ 表示刀切法估计的预测误差; $t_{\max}$ 表示当前优化过程中的最大值; $\varphi$ 表示标准正态分布的累积分布函数。

### 3 实验分析

#### 3.1 仿真模型

构建精确可靠的仿真模型是仿真优化算法的关键。本文采用具备动态交通分配功能的中观交通仿真工具 DynusT<sup>[24]</sup>。广州市降雨量居全国省会城市首位,现有内涝隐患点 300 余个且逐年增加,是我国内涝影响最严重的城市之一<sup>[25-26]</sup>。选取广州中心城区构建中观交通仿真模型,覆盖 160 km<sup>2</sup>,含 2 561 条路段、1 916 个节点及 719 个交通小区。通过融合手机信令起讫点(OD)、卡口车流量及高德地图等多源数据,获得早高峰时段(06:00—10:00)约 76 万机动车轨迹数据。结合广州市规划局、交通局、水务局提供的低洼易浸点排查表、风险点清单及交警部门提供的内涝影响道路信息,识别出 19 个极易内涝点位,对应 47 个完全中断或通行缓慢路段。其中,完全中断路段折减系数设为 1.0,通行缓慢路段折中取 0.5。仿真区域及内涝点位分布如图 1 所示,天河智谷(2~8 号点位)与赤岗、琶洲街道(11~16 号点位)为易涝点位集中区域。

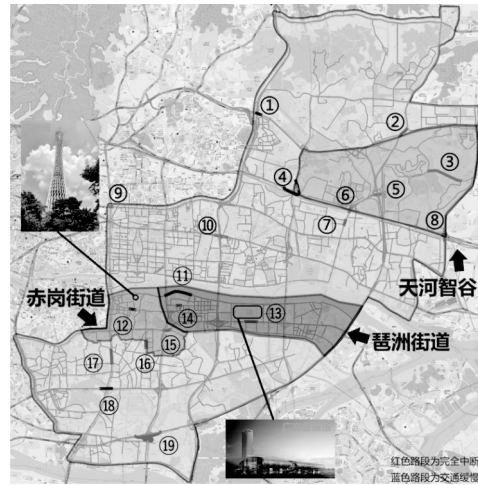


图1 广州路网与内涝点位示意

Fig.1 Schematic diagram of Guangzhou road network and waterlogging points

#### 3.2 代理模型选择

代理模型通过对真实仿真模型的抽象与简化,实现交通条件输入与路网运行状态的快速映射,显著降低仿真优化的计算开销。传统高斯过程模型<sup>[21]</sup>因逆矩阵计算规模随解空间尺寸的增大而急剧增加,难以适应大规模优化问题。为了实现超大规模路网仿真的快速预测,本文采用快速机器学习模型作为代理模型,并对多种机器学习模型的代理能力进行了横向比较与评估。

针对资源平衡约束  $m$  取值的不同情况 ( $m=1, 2, \dots, n$ , 取值上限为受内涝影响路段总数),利用优化算法在相应解空间内搜索求解。每种取值情况下,选取 100 个初始样本构建仿真样本集,并根据路网规模、计算成本及收敛情况,设定每轮仿真迭代次数为 20 次。采用平均绝对误差 ( $e_{MAE}$ ) 和均方根误差 ( $e_{RMSE}$ ) 2 种指标评估 5 种机器学习模型的预测精度,结果如表 3 所示,均在 i7-8565u 1.80 GHz 的计算机上测得。

实验结果表明,随机森林模型在内涝场景中表

表3 代理模型预测精度

Tab.3 Prediction accuracy of surrogate models

代理模型	$e_{MAE}/\%$	$e_{RMSE}/\%$
KNN	3.980	10.269
RF	3.909	10.085
XGB	4.416	11.410
SVR	3.911	10.098
LGBM	4.310	11.120

现出较好的拟合效果,平均绝对误差为3.909%,均方根误差为10.085%。推测其优势在于能够自适应学习高维离散问题的非线性模式,从而提升预测精度。因此,选用随机森林模型作为仿真代理模型。在广州路网早高峰时段测试中,代理模型单次预测耗时仅1.19 s,而DynusT仿真需1300 s(基于i7-8565u 1.80 GHz CPU),仿真效率提升约1100倍。可见,随机森林模型显著提高了运算效率,并降低了计算成本。

### 3.3 仿真优化结果

#### 3.3.1 内涝点位风险及疏导优先级排序

根据算法求解结果,将内涝路段组合频数聚类至内涝点位,并依据完全中断与通行缓慢的影响程度按权重1:2进行归一折算。路段风险计算式为

$$T_p = \frac{1}{l_p} \sum_{m=1}^n \sum_{q \in Q} (k_z e_{zpq} + k_s e_{spq}) \quad (6)$$

式(6)中符号含义见表4。式(6)定义为内涝点位风险,即所包含路段在求解结果中的频数折算平均值。具体而言,在资源平衡约束遍历求解( $m=1,2,\dots,n$ ,取值上限为受内涝影响路段总数)后,统计点位内路段出现频数,按受影响状况折算、求和并求均值,最终得到点位内涝风险值。

表4 路段风险计算公式符号表示

Tab.4 Symbolic representation of road section risk calculation formula

符号	含义
$e_{zpq}, e_{spq} \in \{0, 1\}$	内涝点位 $p$ 处 $q$ 路段是否出现完全中断现象, 1表示发生,0表示未发生
$e_{spq}, e_{spq} \in \{0, 1\}$	内涝点位 $p$ 处 $q$ 路段是否出现通行缓慢现象, 1表示发生,0表示未发生
$l_p$	内涝点位 $p$ 处所包含的路段数
$q, Q$	某一内涝点位处受影响路段及集合
$T_p$	内涝点位 $p$ 的相对风险
$k_z$	路段完全中断折减系数
$k_s$	路段通行缓慢折减系数

基于内涝点位风险及疏导优先级排序,绘制路网内涝风险热力图,如图2所示。将风险等级划分为四等分,阈值表示临界风险值的上下界,可根据实际需求调整划分间隔与方法。

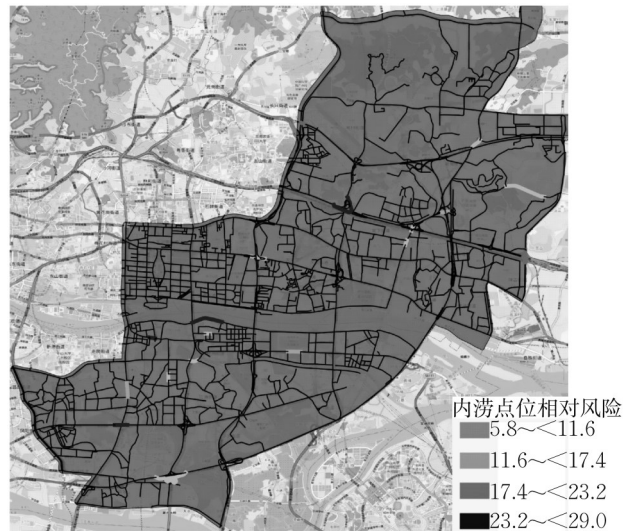


图2 路网内涝风险热力图

Fig.2 Heat map of road network waterlogging risk

#### 3.3.2 算法结果验证

获得内涝路段疏导优先级排序后,采用可变信息标志(VMS)仿真方法验证结果准确性,通过引导车辆绕行缓解内涝路段交通压力。以路网平均行程速度为指标,评估VMS布设方案效果,验证疏导优先级可靠性。具体方案包括:方案1,按已有内涝风险等级从高到低布设;方案2,按算法疏导优先级从高到低布设;方案3,按算法疏导优先级从低到高布设。每种方案重复10次取均值,根据特征点分布趋势利用指数型复合函数 $v_{ats}(u) = \epsilon_1 e^{\epsilon_2 u + \epsilon_3} + \epsilon_4$ 拟合(其中, $\epsilon_1 \sim \epsilon_4$ 为待求解参数, $u$ 为设置的VMS个数, $v_{ats}(u)$ 为路网平均行程速度),结果如图3所示。

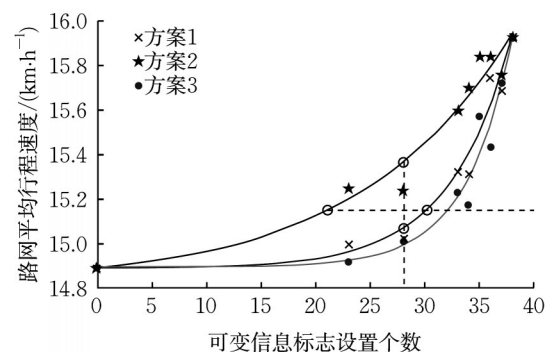


图3 平均行程速度与不同方案下可变信息标志设置个数关系  
Fig.3 Relationship between average travel speed and the number of VMSs under different schemes

仿真结果表明,按疏导优先级从低到高布设VMS对路网平均行程速度的提升效果最弱,与现有数据布设方案效果相近,而从高到低布设效果显著

提升。例如,当治理资源覆盖率达75%(图中垂直虚线)时,按排序结果布设的路网平均行程速度比现有方案提高28.72%,验证了疏导优先级排序的准确性,并为内涝场景交通治理提供参考。在达到相同治理效果(如提升量25%,图中水平虚线)时,按排序结果布设所需VMS数量比现有方案减少42.8%。综上,本文提出的内涝风险评估方法所得疏导优先级能有效提升有限资源投入下的治理收益。

### 3.3.3 内涝风险评估结果对比

从所得内涝风险排序与现有数据中选取部分高风险内涝点位进行对比,结果如表5所示。当前水务

局等部门的评估数据主要基于地形地貌、排水设施等静态要素分析,未考虑交通流特性、动态交通运行及内涝点位间相互作用,对应急疏导预案指导作用有限。算法排序结果显示,高速、立交等路段风险等级较高,且累积流量以及与最近内涝点位距离均大于现有数据,表明算法充分考虑了对路网通行影响较大的路段类型及交通流特征。同时,算法刻画了内涝点位间相互作用,突破了传统评估的区域性限制,能够反映较远点位间的相互影响。此外,算法输出中完全中断路段风险评估更高,而传统方法对完全中断以及通行缓慢等应急场景要素的评估不足。

表5 高风险内涝点位特征对比

Tab.5 Comparison of characteristics between high-risk waterlogging points

评估方式	高风险内涝点位名称	路段等级	车道数	与最近内涝点位距离/m	点位交通影响	累积流量/辆
算法输出	广园快速科韵桥底西往北	立交	2	1 841	完全中断	3 764
	新滘西隧道	主干道	8	1 102	完全中断	6 832
	艺洲路	次干道	6	1 303	完全中断	2 281
	阅江西路	次干道	6	486	完全中断	8 764
	北环高速岑村出口	高速匝道	1	3 080	通行缓慢	3 734
	广园快速珠吉立交	立交	4	2 064	通行缓慢	5 819
有关数据	芳园路	支路	2	486	通行缓慢	717
	悦景路	次干道	4	2 064	通行缓慢	5 236
	赤岗路	次干路	2	902	通行缓慢	805
	敦和路路口南往北	主干道	5	1 127	通行缓慢	5 697
	车陂路隧道	主干道	7	1 081	通行缓慢	753
	广交会展馆5号门	主干道	8	2 453	通行缓慢	9 861

注:累积流量指研究选取时段内通行车辆数。

### 3.3.4 内涝点位特征分析

为了直观展示点位相互作用与内涝影响机理,选取距离较近的阅江西路与芳园路分析,位置如图4所示。

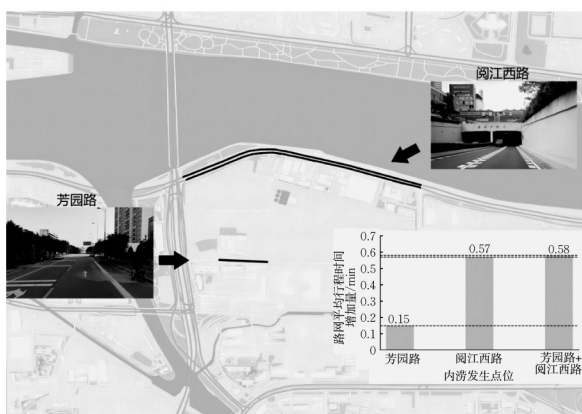


图4 内涝点位位置及组合影响示意

Fig.4 Location and combined impact of waterlogging points

结果显示,点位叠加影响中阅江西路占主导作用,芳园路影响较小,表明点位间影响并非简单加

和。单点静态评估方法忽视点位间相互作用,难以客观评估内涝风险。

芳园路为支路,车流量较小,内涝时仅造成通行缓慢,且周边替代路径较多,从动态交通运行角度看,治理优先级应后置。

综上,为相关部门提供以下建议:①重点关注完全中断且对交通运行影响较大的易涝点位;②应将立交、匝道等易被忽视的特殊路段类型纳入评估范围,突破现有局限性;③相邻内涝点位距离在超大规模内涝风险评估中影响较小,应更多关注流量、通行能力等交通要素;④内涝场景下点位附近可替代路径数是影响路网动态运行的关键因素,可结合出行需求分布与路网构成进行分析。

## 4 结论

(1) 利用DynusT精确建模内涝场景下大规模交通动态演变过程,从动态交通运行角度揭示内涝对路网的影响机理,弥补了传统研究方法的不足。

(2) 分析内涝点位路段组合的影响并搜索求

解,考虑点位间相互作用对路网运行的整体影响,确保结果准确性。

(3) 从优化视角确定使总行程时间最大的内涝路段组合,避免了解析方法对数据质量与数量的依赖,并采用机器学习代理模型降低计算开销。

(4) 内涝风险评估需综合考虑路段类型,重点关注点位附近可替代路径数、车流量及通行能力等交通特征。

后续研究将深入探索内涝对路网的作用机制及演化规律,为精准治理提供科学依据。

#### 作者贡献声明:

朱玉寒:实验设计,数据分析,论文撰写。

邓兴栋:研究数据采集,资源支持。

狄德仕:应用场景验证,实际需求指导。

李冠耀:数据处理。

李 政:指导实验方案设计与算法优化。

田 野:论文选题,总体框架确定,论文修改,学术监督。

#### 参考文献:

- [1] 陈文龙,夏军.广州“5·22”城市洪涝成因及对策[J].中国水利,2020(13):4.  
CHEN Wenlong, XIA Jun. Causes and countermeasures of urban flooding in Guangzhou during the “5·22” period [J]. China Water Resources, 2020(13):4.
- [2] 新华社.河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告公布[J].中国防汛抗旱,2022,32(2):5.  
Xinhua News Agency. Investigation report of “July 20” heavy rain disaster in Zhengzhou, Henan Province [J]. China Flood and Drought Management, 2022, 32(2):5.
- [3] LU X, CHAN F K S, CHEN W Q, *et al.* An overview of flood-induced transport disruptions on urban streets and roads in Chinese megacities: lessons and future agendas [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 321: 115991.
- [4] 赵超辉,万金红,张云霞,等.城市内涝特征、成因及应对研究综述[J].灾害学,2023,38(1):220.  
ZHAO Chaohui, WAN Jinhong, ZHANG Yunxia, *et al.* A review of research on the characteristics, causes, and response of urban waterlogging [J]. Disaster Science, 2023, 38(1): 220.
- [5] YIN J, YU D, YIN Z, *et al.* Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: a case study in the city center of Shanghai, China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 537: 138.
- [6] LI M, HUANG Q, WANG L, *et al.* Modeling the traffic disruption caused by pluvial flash flood on intra-urban road network [J]. Transactions in GIS, 2018, 22(1): 311.
- [7] SU B, HUANG H, LI Y. Integrated simulation method for waterlogging and traffic congestion under urban rainstorms [J]. Natural Hazards, 2016, 81: 23.
- [8] 徐艺扬,李昆,谢玉静,等.基于GIS的城市内涝影响因素及多元回归模型研究:以上海为例[J].复旦学报(自然科学版),2018,57(2):182.  
XU Yiyang, LI Kun, XIE Yujing, *et al.* A study on the factors influencing urban waterlogging and multiple regression models based on GIS: a case study of Shanghai [J]. Journal of Fudan University (Natural Science Edition), 2018, 57(2):182.
- [9] SUN S, ZHAI J, LI Y, *et al.* Urban waterlogging risk assessment in well-developed region of Eastern China [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2020, 115: 102824.
- [10] 程朋根,黄毅.基于AHP-熵权法的南昌市洪涝风险评估[J].人民长江,2021,52(10):18.  
CHENG Penggen, HUANG Yi. Flood risk assessment in Nanchang City based on AHP entropy weight method [J]. Yangtze River, 2021, 52(10):18.
- [11] 罗日洪,黄锦林.基于AHP和GIS的广西岩溶内涝灾害风险区划研究[J].水利规划与设计,2021,34(12):12.  
LUO Rihong, HUANG Jinlin. Risk zoning of karst waterlogging disasters in Guangxi based on AHP and GIS [J]. Water Resources Planning and Design, 2021, 34(12): 12.
- [12] WANG K, WU Y, FAN Q. Construction of rainstorm security pattern based on waterlogging prevention and control: a case study on Zhengzhou City [J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(11): 8911.
- [13] SHU Y, ZHENG G, YAN X. Application of multiple geographical units convolutional neural network based on neighborhood effects in urban waterlogging risk assessment in the city of Guangzhou, China [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2022, 126: 103054.
- [14] GUO Y, QUAN L, SONG L, *et al.* Construction of rapid early warning and comprehensive analysis models for urban waterlogging based on AutoML and comparison of the other three machine learning algorithms [J]. Journal of Hydrology, 2022, 605: 127367.
- [15] CHONG L, OSORIO C. A simulation-based optimization algorithm for dynamic large-scale urban transportation problems [J]. Transportation Science, 2018, 52(3): 637.
- [16] ZHANG W. Simulation-based robust optimization for the schedule of single-direction bus transit route: the design of experiment [J]. Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 106: 203.
- [17] LIU X, QU X, MA X. Optimizing electric bus charging infrastructure considering power matching and seasonality [J]. Transportation Research, Part D: Transport and Environment, 2021, 100: 103057.
- [18] 任永泰,邓朝,王紫阳.基于PSO-GA算法的交叉口仿真优化研究[J].计算机仿真,2022,39(12):204.  
REN Yongtai, DENG Chao, WANG Ziyang. Research on intersection simulation optimization based on PSO-GA algorithm [J]. Computer Simulation, 2022, 39(12): 204.
- [19] 曹涛涛,蒋阳升,赵斌,等.考虑多交叉口相互影响的干道相位

- 差仿真优化研究[J].工业工程,2018,21(6):40.
- CAO Taotao, JIANG Yangsheng, ZHAO Bin, *et al.* Simulation and optimization of phase difference on main roads considering the mutual influence of multiple intersections [J]. *Industrial Engineering*, 2018,21(6): 40.
- [20] EASON J, CREMASCHI S. Adaptive sequential sampling for surrogate model generation with artificial neural networks [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2014, 68: 220.
- [21] LI Z, TIAN Y, SUN J, *et al.* Simulation-based optimization of large-scale dedicated bus lanes allocation: using efficient machine learning models as surrogates [J]. *Transportation Research, Part C: Emerging Technologies*, 2022, 143: 103827.
- [22] KLEIJNEN J P C. Regression and Kriging metamodels with their experimental designs in simulation: a review [J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 256(1): 1.
- [23] FORRESTER A, SÖBESTER A, KEANE A. Engineering design via surrogate modelling: a practical guide [M]. Chichester: Wiley, 2008.
- [24] CHIU Y-C, NAVA E, ZHENG H, *et al.* DynusT user's manual [EB/OL]. [2023-06-25]. <http://dynust.net/wikibin/doku.php>.
- [25] 李彬焯,赵耀龙,付迎春.广州城市暴雨内涝时空演变及建设用地扩张的影响[J].地球信息科学学报,2015,17(4):6.
- LI Binye, ZHAO Yaolong, FU Yingchun. Spatial and temporal evolution of urban rainstorm and waterlogging in Guangzhou and the impact of construction land expansion [J]. *Journal of Geoinformation Science*, 2015, 17(4): 6.
- [26] 杨慧燕,李海燕,赵琴,等.广州市城市内涝特征分析[J].广东气象,2021,43(2):5.
- YANG Huiyan, LI Haiyan, ZHAO Qin, *et al.* Analysis of urban waterlogging characteristics in Guangzhou [J]. *Guangdong Meteorology*, 2021,43(2): 5.

### (上接第520页)

- 32(9):1.
- [4] 曲哲.摇摆墙-框架结构抗震损伤机制控制及设计方法研究[D].北京:清华大学,2010.
- QU Zhe. Study on seismic damage mechanism control and design of rocking wall-frame structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [5] 李国强,张文津,王彦博,等.双段消能摇摆结构体系的地震反应特性研究[J].振动与冲击,2021,40:92.
- LI Guoqiang, ZHANG Wenjin, WANG Yanbo, *et al.* Seismic response characteristics of dual-stage energy dissipation rocking structure system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40: 92.
- [6] CHEN X, TAKEUCHI T, MATSUI R. Seismic performance and evaluation of controlled spine frames applied in high-rise buildings[J]. *Earthquake Spectra*, 2018, 34(3):1431.
- [7] 冯玉龙,吴京,孟少平.连续摇摆墙-屈曲约束支撑框架抗震性能分析[J].工程力学,2016,33:90.
- FENG Yulong, WU Jing, MENG Shaoping. Seismic performance analysis of continuously rocking wall-buckling restrained braced frames [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33:90.
- [8] WIEBE L, CHRISTOPOULOS C. Mitigation of higher mode effects in base-rocking systems by using multiple rocking sections [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2009, 13 (S1):83.
- [9] WIEBE L, CHRISTOPOULOS C, TREMBLAY R, *et al.* Mechanisms to limit higher mode effects in a controlled rocking steel frame. 1: concept, modelling, and low-amplitude shake table testing [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(7):1053.
- [10] PSYCHARIS I. Dynamic behavior of rocking two-block assemblies [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1990, 19(4):555.
- [11] 冯玉龙,吴京,孟少平,等.底部带有屈曲约束支撑的摇摆墙框架结构抗震性能分析[J].振动与冲击,2016,35:35.
- FENG Yulong, WU Jing, MENG Shaoping, *et al.* A seismic performance analysis of rocking wall frame structures with buckling-restrained braces in base [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016,35:35.
- [12] THER T. Model for multiblock columns subjected to base excitation[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2018, 47(2):418.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010 [S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [14] MACRAE G A, KIMURA Y, ROEDER C. Effect of column stiffness on braced frame seismic behavior [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(3):381.
- [15] 包世华,张铜生.高层建筑结构设计和计算 [M].北京:清华大学出版社,2005.
- BAO Shihua, ZHANG Tongsheng. Design and calculation of high-rise buildings [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计规范:GB 50017—2017 [S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [17] Federal Emergency Management Agency. Quantification of building seismic performance factors: FEMA P-695 [S]. Washington DC: Applied Technology Council for Federal Emergency Management Agency, 2009.