

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.009

# 基于微观交通仿真的城市内涝对道路交通的影响评估研究进展

黄国如<sup>1,2,3</sup>, 李梅萍<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

**摘要:**在城市洪涝灾害频发和内涝下交通问题突出的背景下,针对城市内涝对道路交通的影响评估问题,梳理了国内外研究成果,对城市内涝模拟原理以及常用的城市雨洪模型的特点进行了分析,总结归纳了城市内涝对道路交通的影响评估方法,论述了微观交通仿真模型的构建和应用,提出了城市内涝对道路交通影响评估可优化的方向。指出在现有软件缺失和条件有限的情况下,基于积水深度与行车速度的关系式将城市雨洪模型和微观交通仿真模型进行集成,用于分析内涝下交通问题是较为有效的手段;城市内涝对道路交通的影响十分显著,通常反映在道路(损失、性能和结构)、交通工具(行驶速度和安全性)和驾驶员(心理和生理变化)3方面,以及道路-交通工具-驾驶员的综合影响。

**关键词:**城市内涝;城市雨洪模型;微观交通仿真;道路;交通工具;驾驶员

**中图分类号:**TV122;U121 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0069-10

**Research progress on impact assessment of urban waterlogging on road traffic based on micro traffic simulation//** HUANG Guoru<sup>1,2,3</sup>, LI Meiping<sup>1</sup> (1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Water Conservancy Engineering Safety and Green Water Conservancy Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Against the backdrop of frequent urban flood disasters and prominent traffic problems caused by waterlogging, this paper summarizes the research results at home and abroad on the impact assessment of urban waterlogging on road traffic. This paper analyzes the principles of urban waterlogging simulation and the characteristics of commonly used urban rainwater flood models, summarizes the methods for evaluating the impact of urban waterlogging on road traffic, discusses the construction and application of micro traffic simulation models, and proposes the direction for optimizing the impact assessment of urban waterlogging on road traffic. It is pointed out that in the absence of existing software and limited conditions, integrating urban rainwater flood models and microscopic traffic simulation models based on the relationship between waterlogging depth and driving speed is an effective method for analyzing traffic problems under waterlogging. The impact of urban waterlogging on road traffic is very significant, usually reflected in three aspects: road (loss, performance, and structure), transportation vehicles (driving speed and safety), and drivers (psychological and physiological changes), as well as the comprehensive impact of road transportation vehicles drivers.

**Key words:** urban waterlogging; urban rainfall-runoff model; microscopic traffic simulation; road; transportation vehicle; driver

在全球气候变化和城市化进程不断加快的影响下,极端降雨呈现高强度、高频次的特性,“逢雨必涝,城市看海”已成为我国城市面临的严重问题。据全球灾害数据平台(<https://www.gddat.cn/>

[newGlobalWeb/#/FeatureAnalysis](#))统计,2010—2020年,全球每年发生100次以上洪涝灾害,我国是暴雨洪涝灾害的高发区。《中国水旱灾害公报》公布的数据显示,我国500个城市中约有62%发生过城市

**基金项目:**国家自然科学基金项目(52279015)

**作者简介:**黄国如(1969—),男,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:huanggr@scut.edu.cn

暴雨内涝灾害<sup>[1]</sup>。2011—2018年,我国年均均有154座城市发生过城市洪涝灾害,直接经济损失高达2221亿元,造成了巨大的经济损失、人员伤亡以及社会影响<sup>[2]</sup>。在众多受影响的城市系统当中,交通网络是最易遭到破坏的系统之一,交通瘫痪导致社会经济活动中断,受影响后损失更大、影响更广,所需的恢复时间更长<sup>[3]</sup>。《自然-通讯》发表的一篇文章指出,全球每年因自然灾害造成的公路和铁路基础设施的平均损失约达146亿美元,约73%的损坏源自极端降雨引起的洪灾<sup>[4]</sup>。除了直接损坏,洪涝灾害还会对道路交通工程造成变形、渗水等不同程度的破坏,在外部扰动下突然塌陷,进而产生更多的次生灾害,是潜在的重大安全隐患<sup>[5]</sup>。尤其在内涝发生时,降雨会降低轮胎与地面之间的摩擦系数,影响车辆的稳定性和安全性,道路拥堵和驾驶员的视线受阻干扰驾驶员的行为决策,从而增加交通事故发生的概率<sup>[6-8]</sup>。因此,城市内涝下的交通问题已成为当前研究的热点问题。

城市内涝引发的问题加速了城市洪涝模拟研究进展,但由于构建城市雨洪模型和交通网络模型所需的数据庞大且复杂,城市内涝对道路交通的影响多基于经验公式和数值统计进行静态评估,考量的因素较为单一<sup>[9-10]</sup>。微观交通仿真模型可以动态模拟交通流,直观地反映各种交通指标,分析环境、车辆、人之间相互影响,是研究交通问题的核心工具。将城市雨洪模型与微观交通仿真模型结合,模拟城市内涝下的交通运行状态,能够动态地研究城市内涝对道路交通的影响。本文基于现有的研究成果,总结常用城市雨洪模型的特征和微观交通仿真模型构成及应用现状,从不同角度归纳城市内涝对道路交通的影响。

## 1 城市洪涝过程模拟

城市化改变了城市下垫面条件和降雨、下渗等水文过程,当强降雨或连续性降雨发生时,极易引发一系列连锁反应,发生内涝。结合城市特点,对洪涝过程进行数值模拟是目前应对洪灾“防”与“治”的技术手段。城市洪涝形成过程主要包括城市下垫面产流、坡面、管网、河网汇流和地表漫流等主要水文物理过程<sup>[11]</sup>,既包括一维管网/河网属性明显的水流过程,也包括二维地表属性明显的水流过程,构建一二维耦合的水文水动力模型是模拟城市洪涝过程较为有效的途径<sup>[12]</sup>。在构建水文水动力耦合模型时,综合考虑模型的初始条件、边界条件和闸泵调控等工程措施,利用实测数据对模型进行率定和验证<sup>[13]</sup>,然后用于模拟研究区不同暴雨情景下城市淹

没情况,以获取洪水预报详细数据。城市洪涝过程模型结构如图1所示。

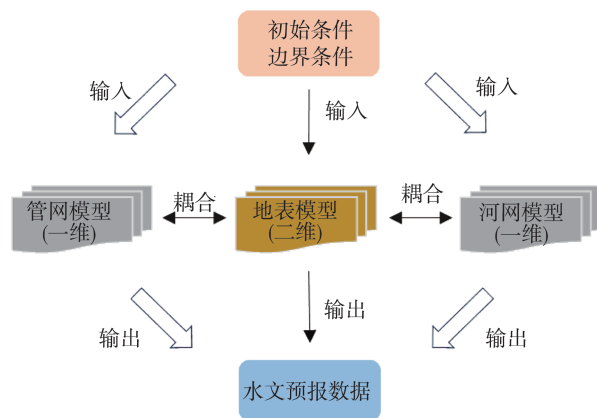


图1 城市洪涝水文水动力耦合模型

Fig. 1 Integrated hydrology and hydrodynamics urban flood model

根据城市洪涝形成原理,自20世纪70年代,国外学者相继开发了SWMM、STORM、PCSWMM、MIKE等城市雨洪模型。1990年,国内学者岑国平<sup>[14]</sup>也首次提出完整的城市雨水径流模型SSCM,该模型可用于城市雨水管道系统的设计和校核,也可作为城市次洪模拟的工具。在众多模型中,目前应用较为广泛的有美国环境保护署开发的开源模型SWMM、DHI开发的MIKE系列模型及英国Wallingford公司开发的InfoWorks ICM模型<sup>[15]</sup>。SWMM是较为完善的暴雨管理模型,因其开源且可不断改进开发的特点被国内外学者广泛应用于城市暴雨雨洪模拟与城市水文分析<sup>[16]</sup>。例如,李江云等<sup>[17]</sup>采用C++编写SWMM程序接口,调用SWMM进行雨洪模型计算并寻找最优灰绿耦合设施实施方案。但由于SWMM没有地表二维水流模块,无法直接获得淹没水深等地表积水状况,只能尝试与其他二维模型进行耦合,获取更为精确的淹没结果<sup>[18]</sup>。MIKE系列模型软件一般模块齐全、前后处理功能完善,能够模拟各种现实场景<sup>[19]</sup>。例如,栾震宇等<sup>[20]</sup>应利用MIKE FLOOD实现MIKE URBAN一维管网模型、MIKE 21二维地表漫流模型的耦合,从而建立城市内涝模型,获取研究区淹没水深。InfoWorks ICM模型是高度集成的洪涝模拟工具,可以方便快速实现城市水文过程以及一二维水动力过程的耦合模拟,完整地模拟城市雨水循环过程,实现城市排水管网系统模型与河道模型的耦合<sup>[21]</sup>。例如,袁绍春等<sup>[22]</sup>基于InfoWorks ICM构建1D/2D耦合模型,采用芝加哥雨型和暴雨强度公式推求降雨重现期分别为1、3、5、10、30、50a的2h降雨过程线作为降雨事件,对小区改造前后内涝积水情况进行

模拟和评估。在洪涝模拟过程中,二维模型计算通常消耗较多计算资源,采用 InfoWorks ICM 内置的 GPU 并行方法,可提高计算效率,大幅缩减了模型计算耗时<sup>[23]</sup>。总体而言,城市雨洪模型的应用和发展日趋成熟,多学科交叉研究也进一步拓展了城市雨洪模型的应用。

## 2 城市交通运行状态模拟

### 2.1 交通仿真模型应用现状

内涝下道路交通规律分析通常采用 3 种方法: ①借助 ArcGIS 平台,综合研究区的淹没和路网情况进行空间分析和叠加分析,如宋英华等<sup>[24]</sup>运用 ArcGIS 软件构建了不同耦合半径的公交-地铁双层交通网络,针对内涝导致的单一站点失效和多站点失效情况进行了故障模拟。②基于编程语言建立模型,将交通分析和淹没分析相结合,如周倩倩等<sup>[25]</sup>依据实际地理位置在 Matlab 中搭建区域道路网络,评估极端降雨对交通网络的影响以及受涝区域最佳交通路径的选择;黄清雨<sup>[26]</sup>利用 C#语言和 ArcGIS 底层开发技术,基于 Microsoft Visual Studio 2010 开发平台完成暴雨内涝影响下城市交通动态模拟工具的开发。③借助交通仿真模型进行内涝下交通运行状态的还原,如李鹏程等<sup>[27]</sup>结合 SWMM 和 SUMO 交通仿真模型定量研究了内涝积水对交通系统运行状态的影响度,经实例验证,建立的模型具有一定的合理性;陈海然<sup>[28]</sup>通过拟合曲线得出积水深度和行车速度间的函数公式,根据现场调查的 OD 交通量以及现场道路交叉口的真实情况数据,构建研究区交通模拟仿真模型 Synchro,得到暴雨天气下研究区部分道路交叉口通行能力和服务水平。以上 3 种方法各有优势和不足,利用 ArcGIS 平台能够对交通网络和道路积水进行叠加分析,但无法考虑车和驾驶员等因素影响。基于编程语言生成的模型在一定程度上综合考量较多因素,但对研究人员的编程能力提出较高的要求,仅依赖交通仿真模型无法输入水文数据,模拟水流运动。从交通分析角度看,交通仿真模型具有直观、准确、灵活的特点,既能综合考虑

单个车辆的行驶规则、跟车规则和换道规则,还能考虑车辆与人之间、车辆与车辆之间、车辆与环境之间的综合作用,进而再现交通流的时空变化,是必不可少的交通分析工具。因此,若能结合城市雨洪模型的输出结果,在交通仿真软件中动态展示内涝下的交通运行状态,得到的仿真结果将更真实和准确,也能为极端降雨下交通问题的治理提供参考和依据。

根据交通仿真模型对交通系统描述的细节程度不同,可将其划分为宏观、中观(又称准微观)、微观 3 种<sup>[29-30]</sup>。宏观交通仿真模型通过流密速关系等一些集聚性的宏观模型来描述,即描述车辆整体流动。中观交通仿真模型往往以若干辆车构成的队列为单元,描述队列在路段和节点的流入流出行为,以及车辆的车道变换之类的行为,例如研究路网中车簇模型的运行<sup>[31]</sup>、公交与社会车辆混合交通流模型速度变化<sup>[32]</sup>。微观交通仿真模型是以单个车辆为基本单元,研究车辆在道路上的跟车、超车及车道变换等微观行为,还能将驾驶员的因素考虑在内,模拟交通运行情况<sup>[33]</sup>。相比之下,微观交通仿真模型综合了人、车、路和环境交通 4 种要素之间的相互作用,再现城市动态交通,较适用于评价内涝对交通的影响<sup>[34]</sup>。目前应用较为广泛的微观交通仿真模型如表 1 所示。由表 1 可见,微观交通仿真模型各个功能模块均开发得相对完善,能够综合人-车-路(环境)进行联合仿真,协助研究人员对交通问题进行深入研究。微观交通仿真模型除了进行拥堵分析、预测道路网络局部路口的微观交通流特征<sup>[35]</sup>,还可以结合实地调查数据,分析常态下新增道路穿越小区对小区噪声的影响<sup>[36]</sup>和研究路段内现有信号灯配时下机动车污染物排放情况<sup>[37]</sup>。此外,部分微观交通仿真模型通过设置参数,试图将驾驶员情绪影响和干扰因素整合到已建立的模型中,使得模拟更为逼真<sup>[33]</sup>,进一步增加仿真的准确度。

### 2.2 微观交通仿真模型构建

图 2 为微观交通仿真模型结构,模型包括 5 个基本模块:交通网络模块、交通需求模块、车辆行驶模块、交通控制管理方案生成模块、仿真输出模

表 1 主要微观交通仿真模型及其功能

Table 1 Main microscopic traffic simulation model and its functions

模型	交通堵塞分析	动态交通分配	信号控制	检测器	公交优先	车辆跟驰、换道及间距接收	交叉口转弯运动模型	路口、车辆行人相互影响模型	停车影响模型	可变驾驶员反应时间
Aimsun	有	有	精细	精细	有	有	有	有	无	有
Paramics	有	有	精细	精细	有	有	有	有	有	有
Corsim	无	拓展困难	较精细	精细	拓展困难	有	有	有	有	无
Vissim	有	有	精细	不详	有	有	有	有	有	无
Trans Modeler	有	有	精细	精细	有	有	有	有	有	不详
SUMO	有	有	精细	精细	有	有	有	有	有	无

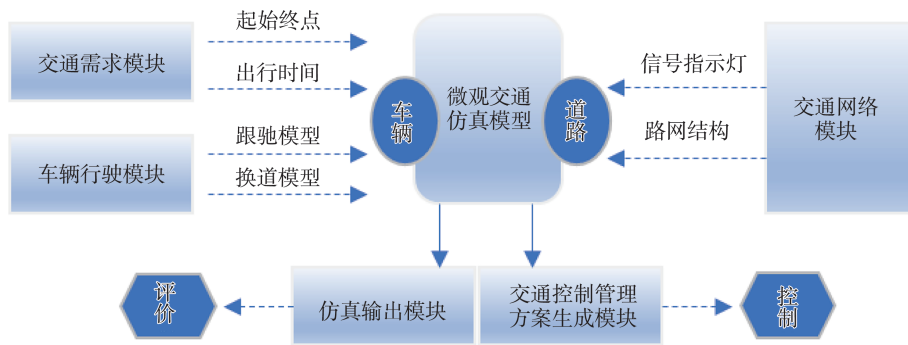


图2 微观交通仿真模型结构

Fig. 2 Structure of microscopic traffic simulation model

块<sup>[38-39]</sup>。交通网络模块是以节点和线段的形式表示路网的拓扑关系,通过交通规则实现路口连接,路网还包括信号灯和检测器等设施。交通需求模块包括车辆出行路径、出行时间、起始终点等,是决定车流量和车速的关键。车辆行驶模块实际上是对车辆在道路上的跟车、超车及车道变换等微观行为的精确模拟。交通控制管理方案生成模块能根据仿真模型中全局路网的动态属性生成相应的管理方案。仿真输出模块是以动态图像的形式直观地表现出路网上车辆的运行情况,并通过检测器输出的参数进行评价。仿真输出的主要评价指标包括交通效益方面的指标(平均延误、停车次数、排队长度、拥挤度、平均速度、饱和度)、交通安全方面指标(平均车头时距、事故次数)和交通环境方面的指标(油耗量、废气排放、噪声水平)<sup>[39]</sup>。

在上述模块中,交通网络模块和交通需求模块是微观交通仿真模型的核心,也是决定模型准确度的关键。交通需求数据的获取一直是模型构建的难点,目前大多数研究通过3种方法收集交通需求数据:来自摄像机的轨迹数据、来自感应线圈检测器的速度数据和来自数据记录器的浮动数据<sup>[40]</sup>。由于日益严格的隐私政策,在公共道路上安装摄像机越

来越难获得许可,通过大数据的手段也很难获取百度地图和高德地图等出行平台的数据。因此,只能通过间接方式获取交通需求数据,如邵薇薇等<sup>[41]</sup>通过百度API的路线规划功能间接获取通行速度,但其精度还有待进一步验证。

### 3 城市雨洪模型与微观交通仿真模型集成

为探究城市内涝对道路交通影响的问题,相关学者根据试验和实测数据提出了积水深度与行车速度的关系式(表2),从而建立城市雨洪模型与微观交通仿真模型的联系。例如:梅超等<sup>[42]</sup>根据杜磊等<sup>[43]</sup>提出的积水深度与行车速度的关系式计算受道路积水影响后衰减的车速,将衰减后的车速输入交通模型软件TransCAD中,获得受内涝影响后的动态交通模拟结果,将其与常态下交通运行结果进行对比,以评估内涝对道路交通的影响;李国杰<sup>[44]</sup>对研究区积水深度和交通影响度的模拟结果进行回归分析,得到研究区域的内涝交通影响经验公式,并结合SWMM得到内涝积水深度,对各道路的车速进行预测,以对内涝下交通问题提出应对措施。此外,还有学者基于三维有限元模型对轮胎-流体-路面相互作用进行建模<sup>[45]</sup>,揭示车辆在雨天湿滑道路上行

表2 积水深度与行车速度关系式

Table 2 Relationship between water depth and driving speed

时间	作者	公式	符号含义
2011年	Huang等 <sup>[46]</sup>	$v_t = \begin{cases} (1 - h_r)v_f & h_r < 1\text{ m} \\ 0 & h_r \geq 1\text{ m} \end{cases}$	$v_t$ 为道路有积水的行车速度; $v_f$ 为道路无积水下的行车速度; $h_r$ 为道路积水深度
2011年	杜磊等 <sup>[43]</sup>	$v = \frac{v_0}{2} \tanh\left(\frac{-x+a}{b}\right) + \frac{v_0}{2}$	$v$ 为行车速度; $v_0$ 为该点设计车速; $x$ 为积水深度; $a$ 为车辆停滞的临界积水深度的中值; $b$ 为衰减弹性系数
2017年	Pregmolato等 <sup>[47]</sup>	$v_w = 0.0009w^2 - 0.5529w + 86.9448$	$v_w$ 为在一定水深中确保车辆安全行驶的最大速度; $w$ 为积水深度
2018年	李国杰 <sup>[44]</sup>	$D = (v_n - v_p)/v_n$ $D = 0.2269 \ln h + 0.0839$	$D$ 为交通影响指标; $h$ 为内涝积水; $v_n$ 为正常情况下的车速; $v_p$ 为道路有积水时的车速
2022年	Phanse等 <sup>[48]</sup>	$v_{\text{rain}} = -0.6156d - 1.248i + 46.60$ $v_{\text{rain}} = 0.033d^2 - 0.016i^2 - 1.595d - 1.06x + 51.013$	$i$ 为降雨强度; $d$ 为水深; $v_{\text{rain}}$ 为雨天条件下的车速



驶时打滑发生的原理,较好地估计汽车在潮湿路面中采用不同速度行驶时的防滑能力。但在降雨实际发生时,路面水流除了平动和转动外,还伴随变形,其产生的作用力和速度较难测量,因此水流速度等特性与车速之间的复杂关系能否通过关系式建立联系尚未得到彻底解答。

构建综合考虑道路-交通工具-驾驶员受洪涝影响的都市雨洪模型与微观模型的集成模型是探究都市内涝对道路交通的影响机制的有效途径,集成方法如图3所示。在获取基础数据构建都市雨洪模型后,解析研究区易涝路段数量、位置及积水深度。根据道路积水深度与行车速度的关系式,计算车辆在存在积水但没有超过相应阈值的道路上的可行驶最大速度,结合驾驶员在不同能见度下的偏好车辆行驶速度,取两者最小值为该时刻的车辆实际行驶速度,进而通过交通控制接口将该速度赋值到对应车辆,控制交通仿真模型的仿真过程,从而完成洪涝状态下都市雨洪模型与微观交通仿真模型集成模型的构建,实现降雨过程和交通流变化的动态交互。该集成模型在考虑了降雨、车辆行驶规则、车辆与车辆之间的相互作用、驾驶员等因素的情况下,利用积水深度与行车速度的关系耦合了城市淹没分析和交通分析,发挥了各自优势,能够更准确地模拟都市内涝条件的交通运行的规律和特征。

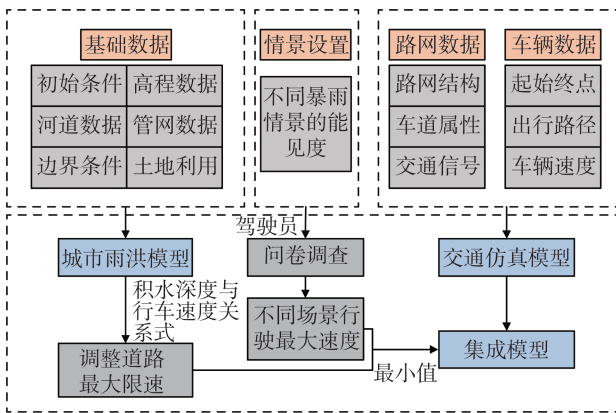


图3 都市雨洪模型和微观交通仿真模型集成方法

Fig.3 Method of integrated simulation of urban rainfall-runoff model and microscopic traffic simulation model

## 4 都市内涝对道路交通影响评估

当道路网络被洪灾破坏,合理准确地评估其产生的影响对于暴雨内涝灾害应急管理和保障人民群众的生命财产安全至关重要<sup>[49]</sup>。以“降雨”“暴雨”“洪涝”“交通”“路网”等为关键词在中国知网和 web of science 进行检索,得到各年国内外发表的有关内涝与交通相结合的文。检索结果显示,

国内外学者对内涝下交通问题的关注度逐年上升。Tanner<sup>[50]</sup>在1952年就发现降水量和交通流量之间存在很高的负相关关系,而国内学者从2000年开始关注内涝下的交通问题。由于国内外技术、资源和对数据保护政策不同,在该问题的研究方法上存在一定差异。国外学者对该问题的探索从公式分析、模型模拟过渡到结合人工智能方式开展内涝下交通问题的研究。如 Nigam 等<sup>[51]</sup>提出混合深度学习模型 CNN-LSTM 来提取天气和交通流之间的时空相关性以及交通流量变量之间的时间关系,预测不同降雨情景下的交通流量,结果表明该模型的预测精度比其他机器学习和深度学习模型高;Gupta 等<sup>[52]</sup>利用神经网络预测当天降雨导致道路积水和交通中断情况,方便通勤者规划行程,避开故障路段。此外,国外更易获取交通管理部门提供的实时交通数据,因此对数据进行直接分析也成为另一种途径。对比之下,国内更侧重于采用经验公式或大数据挖掘等方法间接分析,如 Wu 等<sup>[53]</sup>结合社交媒体数据中频繁出现的对某个位置的积水深度的描述提取暴雨内涝词汇,分别计算各区域百分比,用于确定暴雨期间容易被淹没的区域,并优化城市应急物流配送路线。在研究内容上,国内外研究存在共性,大量的研究成果表明,都市内涝对于道路交通的影响十分显著,主要体现在道路、交通工具、驾驶员3方面。

### 4.1 都市内涝对道路的影响评估

出于经济、社会、环境和安全的原因,道路网络在社会发展方面扮演着十分重要的角色。学者评估都市内涝对道路的影响主要集中在3个方面:道路的损失评估、道路性能评估、道路结构变化分析。①在评估暴雨造成道路的损失方面,相较于传统的统计方法,Huang 等<sup>[46]</sup>结合城市道路积水的排水次数理论模型和经济损失评估模型等,建立了洪灾经济损失估算模型。该方法计算简便,输入变量少,适用于快速评估某一地区的经济损失。除了道路损坏带来的损失,还有因道路故障带来的人时间价值和车油耗的损失,杜磊等<sup>[43]</sup>建立了由于积水和交通拥堵造成的经济损失模型,研究由于道路积水造成车速下降所带来燃油损耗和由于延误所造成的时间价值损失。②在道路性能评估方面,主要包括了道路的脆弱性、韧性、可达性、风险评估等。例如:李欣<sup>[54]</sup>建立城市交通路网抗涝评价模型,将模型评价指标对应到 SWMM 参数和输出,根据输出结果进行量化评价,并基于评价结果有针对性地对研究区提出提升建议;董洁霜等<sup>[55]</sup>根据路网节点和边的重要性指标对不同降雨强度下道路网络脆弱源进行识

别,在脆弱集中找出关键路段(即失效后对路网联通性影响最大的路段),为改善路网抵抗灾害能力提供基础;Sohn<sup>[56]</sup>假设位于马里兰州百年洪泛区的道路依次中断,根据距离和交通流多次计算可达性指数,以此量化洪水对国家交通系统的潜在影响;Tang等<sup>[57]</sup>在考虑降雨天气的影响下,从连接可靠性、畅通可靠性和恢复可靠性评价道路的可靠性。③在道路结构变化分析方面,极端降雨不仅使得道路的重要节点发生转移,道路拓扑结构发生变化<sup>[56]</sup>,而且雨水的连续冲刷导致水土流失,也会影响道路的组成结构。

#### 4.2 城市内涝对交通工具的影响评估

道路积水导致车辆无法行进,甚至导致汽车出现故障瘫痪是造成内涝下交通拥堵最为直接的原因。多位学者根据不同的方法获取不同交通数据进行统计和回归分析,发现暴雨情景下,车辆行驶速度与积水深度有一定的关系。例如:Su等<sup>[58]</sup>基于试验数据使用双线性插值获得降雨强度、水深和车速的函数关系,即降雨强度越大,车速越低;杜磊等<sup>[43]</sup>在雨天对北京的6个调查点进行了雨水深度和行车速度的实地调查,根据调查数据绘制出行车速度与积水深度的关系图,结果表明随着积水深度增加,车辆的速度越来越低,当积水深度达到5cm时,车速下降加快,当积水深度超过15cm时,车速降低到0,交通已瘫痪;Brilon等<sup>[59]</sup>基于德国高速公路15个站点的交通数据分析得到,所有变量中,环境条件对车辆平均速度的影响最大,由于天气影响,双车道路段的速度降低约9.5 km/h,三车道路段降低约12 km/h;曾伟良等<sup>[60]</sup>结合浮动车GPS数据和气象站降水量检测数据,分析发现持续性降雨造成交通行驶速度产生较大波动。综上可得,不同交通数据分析得到一致结论,即车速与降雨呈现显著负相关关系。与此同时,极端降雨通过改变交通工具的物理属性影响行车的安全性。在降雨条件下路面积水在轮胎和路面之间产生水膜,路面摩擦系数比正常情况低,造成车辆与轮胎的摩擦(附着)系数减小,制动比正常的情况延迟,当发生紧急情况时,车辆不能按照驾驶人的指示行驶,更容易失稳或发生碰撞而引发交通事故<sup>[61]</sup>。此外,车辆易侧滑跑偏使得在车流量中密度区道路上,换道率与晴天相比有明显下降,大大增加拥堵的概率<sup>[62]</sup>。

#### 4.3 城市内涝对驾驶员的影响评估

动态城市道路交通是数万甚至数百万人的行为相互作用的产物<sup>[63]</sup>,驾驶员的行为决策是城市内涝造成道路拥堵的成因之一。研究发现降雨降低能见度,导致驾驶员难以识别周围车辆和障碍物,同时,

由于降雨后潮湿的路面对光线起到了反射作用,对驾驶员的整体视野造成了较大干扰,进而导致驾驶员做出减速的行为<sup>[64]</sup>。如赵炜华等<sup>[65]</sup>发现当降雨强度和行驶速度耦合作用于驾驶员时,驾驶员行车视认距离随着降雨强度的增加逐渐减小,造成相同速度下允许驾驶员反应时间缩短,进而诱发碰撞事故;Phanse等<sup>[48]</sup>设计了基于图像的问卷,创建16个场景捕捉驾驶员在不同能见度和内涝条件下的感知,结果显示在没有降雨和积水的情况下,驾驶员倾向于以52 km/h的速度行驶,而在有暴雨和道路有积水的情况下,驾驶员会减速到16 km/h。不仅如此,在降雨情况下,性别、年龄和驾驶经验等因素会影响驾驶员对速度的选择。如Han等<sup>[66]</sup>详细分析了1994—2008年德克萨斯州与降雨相关的车祸数据,发现与降雨有关的致命车祸约占所有致命车祸的6.8%,且男性在降雨条件下选择危险行为的可能性比女性更高,涉及致命车祸的男性驾驶员远多于女性。此外,王超等<sup>[67]</sup>研究发现,降雨不仅影响驾驶员生理状况(视觉对环境的感知),还会改变驾驶员的心理状态(注意力集中程度、焦虑情绪),当每12h降水量为15.0~29.9 mm(小到中雨)时,驾驶员的生理、心理变化随降水量增加而加剧,其心理变化程度要超过生理变化程度;Dhaliwal等<sup>[68]</sup>通过分析南加州的实际交通数据表明,降雨天气高速公路上的车头时距会增大,侧面体现驾驶员在雨天驾驶时谨慎心理;赵亮等<sup>[69]</sup>基于驾驶模拟器的研究得到,驾驶员的心率变化率与操作错误次数之间具有较好的相关性,在雨天条件下,驾驶员的心率变化率有增长趋势,操作失误的次数增加。

道路、交通工具和驾驶员共同构成交通系统,当内涝灾害来临时,其中一个因素受影响,会引起另外两因素发生连锁损害。如道路积水导致交通工具功能故障,进而形成不利的驾驶环境,影响驾驶员的判断时,驾驶员只能通过降低速度保证行车安全性。而当车流密度不变,车辆速度降低时,极易造成交通拥堵。因此,在进行城市内涝对道路交通的影响评估时应综合考虑3方面因素,目前部分学者已开展相关研究,但研究成果较少。如Zhu等<sup>[70]</sup>基于SWMM和TELAMAC-2D进行洪水模拟预测洪水的时空分布,采用智能体模型模拟城市洪水期间的驾驶行为,建立跟驰模型研究城市洪水对交通拥堵的影响机制;Su等<sup>[58]</sup>根据问卷采集暴雨期间司机的行为,估计不同水深和能见度条件下车辆的速度,并基于处理后的数据建立微观交通模拟评估交通运行状况。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

a. 较多研究以城市雨洪模型输出道路积水深度为基础,基于经验公式对城市交通网络进行静态评估;较少有学者将城市雨洪模型与交通仿真模型结合,模拟城市内涝下的交通运行动态,缺乏定量评价。

b. 在现有软件缺失和条件有限的情况下,基于积水深度与行车速度的关系式,将城市雨洪模型和微观交通仿真模型进行集成用于分析城市内涝对道路交通的影响是较为有效的手段。

c. 城市内涝对交通道路的影响十分显著,通常反映在道路(损失、性能和结构)、交通工具(行驶速度和安全性)和驾驶员(心理和生理变化)3方面,以及道路-交通工具-驾驶员的综合影响。

### 5.2 展望

a. 在研究内容上,目前更多注重城市内涝下交通拥堵以及道路的损失评估,但对汽车因积水拥堵而导致污染物排放增加的关注度较少。在全球气候变化和双碳背景下,今后研究可从汽车产生的尾气和噪声等角度评估城市内涝对交通网络出行环境效益的影响,进一步丰富城市内涝对道路交通影响评价的内容。

b. 在研究方法上,可利用大数据技术间接获取交通需求数据,综合多源交通数据,以积水深度和行车速度的关系式,在微观交通仿真平台实现内涝下的交通运行状态模拟。此外,还可基于编程语言对微观交通仿真模型开发,解决城市雨洪模型和交通仿真模型数据接口问题,发挥各自优势,将两者更好地融合。

c. 在研究结果上,诸多研究揭示了内涝下的交通规律和问题,却止步于交通问题的解决,未能全面分析其影响并提出解决的建议,因此还需进一步研究和探索,提出更多具有实践价值的建议和方法。

### 参考文献:

[1] 孔锋. 中国不同强度降雨量的多属性时序变化特征及其对 ENSO 的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6): 1387-1400. (KONG Feng. Multi-attribute temporal variation of rainfall with different intensities in China and its response to ENSO[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(6): 1387-1400. (in Chinese))

[2] 夏军强,董柏良,李启杰,等. 近年城市洪涝致灾的水动力学机理分析与减灾对策研究[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(4): 66-71. (XIA Junqiang, DONG Boliang, LI Qijie, et al. Study on hydrodynamic mechanisms and

disaster reduction countermeasures of recent urban floods [J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(4): 66-71. (in Chinese))

[3] 向立云. 城市洪涝灾害的成灾模式初步分析[J]. 自然灾害学报, 1995(增刊1): 197-201. (XIANG Liyun. Analysis of urban flood hazard mode [J]. Journal of Natural Disasters, 1995(Sup1): 197-201. (in Chinese))

[4] KOKS E E, ROZENBERG J, ZORN C, et al. A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 2677.

[5] 涂善波,郭士明,耿青松,等. 郑州市极端暴雨灾后交通工程隐患应急检测分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 9-16. (TU Shanbo, GUO Shiming, GENG Qingsong, et al. Emergency detection analysis of traffic projects' problems after the extreme rainstorm disaster in Zhengzhou City [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 9-16. (in Chinese))

[6] 黄兰可. 沥青路面水膜效应及临界滑水速度研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 118-124. (HUANG Lanke. Research review on water film effect and critical hydroplaning velocity of asphalt pavement surface [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 118-124. (in Chinese))

[7] 赖雯洁. 暴雨内涝影响下城市应急服务可达性评价[D]. 上海:华东师范大学, 2020.

[8] 邵蕊,邵薇薇,苏鑫,等. 基于 TELEMAC-2D 模型分析不同洪涝情景对城市应急响应时间的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(1): 60-69. (SHAO Rui, SHAO Weiwei, SU Xin, et al. Impact of various flood scenarios on urban emergency responses times based on the TELEMAC-2D model [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(1): 60-69. (in Chinese))

[9] BO K, TENG J, ZHANG C, et al. Commuting in the storm: adaptation of transit riders and measures for transit operator: a case in Shanghai [J]. Journal of Advanced Transportation, 2021(2): 1-15.

[10] 易嘉伟,王楠,千家乐,等. 基于大数据的极端暴雨事件下城市道路交通及人群活动时空响应[J]. 地理学报, 2020, 75(3): 497-508. (YI Jiawei, WANG Nan, QIAN Jiale, et al. Spatio-temporal responses of urban road traffic and human activities in an extreme rainfall event using big data [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(3): 497-508. (in Chinese))

[11] 臧文斌. 城市洪涝精细化模拟体系研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2019.

[12] 黄国如,陈文杰,喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 334-344. (HUANG Guoru, CHEN Wenjie, YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and

- hydrodynamics urban flood model[J]. Advances in Water Science,2021,32(3):334-344. (in Chinese))
- [13] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望[J]. 水利学报,2021,52(4):381-392. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))
- [14] 岑国平. 城市雨水径流计算模型[J]. 水利学报,1990,21(10):68-75. (CENG Guoping. A model to simulate stormwater runoff in urban area[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1990,21(10):68-75. (in Chinese))
- [15] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 基于 InfoWorks ICM 的城市洪涝模拟及其风险分析:以福州市白马河片区为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(6):784-793. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. InfoWorks ICM model simulation and risk analysis: case of Baima River district, Fuzhou [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science),2021,57(6):784-793. (in Chinese))
- [16] 田子阳,褚俊英,周祖昊,等. 基于 GIS 和 SWMM 模型的城市内涝水文规律分析[J]. 人民黄河,2022,44(10):18-24. (TIAN Ziyang, CHU Junying, ZHOU Zuhao, et al. Hydrologic analysis of urban waterlogging based on GIS and SWMM model[J]. Yellow River,2022,44(4):18-24. (in Chinese))
- [17] 李江云,李瑶,胡子欣. 灰绿耦合雨洪系统多目标优化建模与应用[J]. 水资源保护,2022,38(6):49-55. (LI Jiangyun, LI Yao, HU Zixin. Multi-objective optimization modeling and application of grey-green coupling stormwater system[J]. Water Resources Protection,2022,38(6):49-55. (in Chinese))
- [18] 王兆礼,陈昱宏,赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护,2022,38(1):117-124. (WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124. (in Chinese))
- [19] 徐美,刘舒,孙杨,等. 利用洪涝模型进行城市内涝风险快速识别与预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(8):1185-1194. (XU Mei, LIU Shu, SUN Yang, et al. Rapid identification and early warning of urban waterlogging risk using flooding model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2020,45(8):1185-1194. (in Chinese))
- [20] 栾震宇,金秋,赵思远,等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. 水资源保护,2021,37(2):81-88. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):81-88. (in Chinese))
- [21] 周天泽,梁骞,王艺颖. 基于 InfoWorks ICM 模型的内涝风险评估及综合整治方案构建[J]. 中国防汛抗旱,2021,31(5):12-19. (ZHOU Tianze, LIANG Qian, WANG Yiyang. Waterlogging risk assessment and comprehensive renovation scheme construction based on InfoWorks ICM model[J]. China Flood & Drought Management,2021,31(5):12-19. (in Chinese))
- [22] 袁绍春,王怀鋈,吕波,等. 基于 InfoWorks ICM 模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计及评估[J]. 水资源保护,2020,36(5):43-49. (YUAN Shaochun, WANG Huaijun, LYU Bo, et al. Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks ICM model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5):43-49. (in Chinese))
- [23] 廖如婷,徐宗学,叶陈雷,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝过程模拟:以北京市大红门排水区为例[J]. 水资源保护,2023,39(3):109-117. (LIAO Ruting, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Simulation of urban waterlogging processes based on SWMM and InfoWorks ICM model: a case study of Dahongmen drainage area in Beijing City [J]. Water Resources Protection,2023,39(3):109-117. (in Chinese))
- [24] 宋英华,李玉枝,霍非舟,等. 城区内涝条件下城市公交-地铁双层交通网络的脆弱性分析[J]. 安全与环境工程,2021,28(2):114-120. (SONG Yinghua, LI Yuzhi, HUO Feizhou, et al. Vulnerability of two-layer traffic network of bus and subway under waterlogging condition based on complex network theory [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(2): 114-120. (in Chinese))
- [25] 周倩倩,李阿婷,张茜. 城市暴雨内涝对交通的影响及路线优化对策[J]. 广东工业大学学报,2018,35(4):81-85. (ZHOU Qianqian, LI Ating, ZHANG Xi. Vulnerability analysis and traffic route optimization in urban flood events[J]. Journal of Guangdong University of Technology,2018,35(4):81-85. (in Chinese))
- [26] 黄清雨. 暴雨内涝影响下城市交通动态模拟工具的开发与应用[D]. 上海:华东师范大学,2017.
- [27] 李鹏程,李昊洋. 基于城市雨洪模型的内涝交通影响研究[J]. 水电能源科学,2017,35(5):62-65. (LI Pengcheng, LI Haoyang. Rainstorm model-based approach for traffic loss evaluation under condition of urban inundation [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(5):62-65. (in Chinese))
- [28] 陈海然. 海绵化改造对城市内涝及交通的影响研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [29] 魏明,杨方廷,曹正清. 交通仿真的发展及研究现状[J]. 系统仿真学报,2003,15(8):1179-1183. (WEI Ming, YANG Fangting, CAO Zhengqing. A review of development and study on the traffic simulation [J]. Journal of System Simulation,2003,15(8):1179-1183.



- (in Chinese))
- [30] 邹智军,杨东援. 道路交通仿真研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1 (2): 88-91. (ZOU Zhijun, YANG Dongyuan. A comprehensive review of road traffic simulation research [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1 (2): 88-91. (in Chinese))
- [31] 万凌松,袁芳,宋星. 城市中观交通仿真的交通流车簇模型[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(4): 816-818. (WAN Lingsong, YUAN Fang, SONG Xing. Car group traffic flow model of urban traffic mesoscopic simulation system[J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(4): 816-818. (in Chinese))
- [32] 朱依婷,闫云,何兆成. 公交与社会车辆混合的中观交通建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(9): 2019-2027. (ZHU Yiting, YAN Yun, HE Zhaocheng. Mesoscopic modeling and simulation of mixed traffic flow of buses and vehicles[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(9): 2019-2027. (in Chinese))
- [33] CRISTEA R, RULEWITZ S, RADUSCH I, et al. Implementation of cognitive driver models in microscopic traffic simulations [C]// Proceedings of the 9th EAI International Conference on Simulation Tools and Techniques. New York: Association for Computing Machinery, 2016: 104-111.
- [34] 李世程,刘瑞军,鲁忠,等. 国内外主流交通仿真软件的对比分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2021, 48(4): 10-12. (LI Shicheng, LIU Ruijun, LU Zhong, et al. Comparative analysis of mainstream traffic simulation softwares at home and abroad [J]. Tractor & Farm Transporter, 2021, 48(4): 10-12. (in Chinese))
- [35] 赵明翠,成卫,戢晓峰,等. 基于 TransCAD 与 TransModeler 的交通影响分析方法[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(27): 6689-6694. (ZHAO Mingcui, CHENG Wei, JI Xiaofeng, et al. Methodology of TIA based on traffic software TransCAD and TransModeler [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(27): 6689-6694. (in Chinese))
- [36] 蔡铭,王海波,余志,等. 基于微观交通仿真的居住小区道路交通噪声研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(24): 48-55. (CAI Ming, WANG Haibo, YU Zhi, et al. Road traffic noise study for a house community based on microscopic traffic simulation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(24): 48-55. (in Chinese))
- [37] 张恒. 城市交通干道内机动车污染物排放和扩散的仿真模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [38] 商蕾,高孝洪,蒋汉平. 城市微观交通模型建模及仿真实现[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(4): 499-502. (SHANG Lei, GAO Xiaohong, JIANG Hanping. Urban microscopic traffic flow modeling and simulation [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2003, 27(4): 499-502. (in Chinese))
- [39] 周光伟,杨晓光. 城市道路交通微观仿真模型结构[J]. 中国公路学报, 2001(增刊1): 75-78. (ZHOU Weiguang, YANG Xiaoguang. Model structure for simulating urban traffic[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001(Sup1): 75-78. (in Chinese))
- [40] TREIBER M, KESTING A, THIEMANN C. Traffic flow dynamics: data, models and simulation [M]. Berlin: Springer, 2013.
- [41] 邵薇薇,刘家宏,王开博,等. 基于情景模拟的城市洪涝交通影响评估[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(10): 1591-1605. (SHAO Weiwei, LIU Jiahong, WANG Kaibo, et al. Assessment of urban flood impact on traffic flow based on scenario simulations [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(10): 1591-1605. (in Chinese))
- [42] 梅超,陈宇枫,刘家宏,等. 基于情景模拟的城市内涝对道路交通的影响评估[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 31-38. (MEI Chao, CHEN Yufeng, LIU Jiahong, et al. Evaluation of the impacts of urban waterlogging on road traffic based on scenario simulation [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 31-38. (in Chinese))
- [43] 杜磊,杨晓宽. 不同道路积水情况对交通影响及造成损失的研究[C]//科技创新绿色交通:第十一次全国城市道路交通学术会议论文集. 北京:《特种结构》编辑部, 2011: 389-393.
- [44] 李国杰. 基于 SWMM 模型的葫芦岛市内涝交通影响分析[J]. 中国水能及电气化, 2018, 155(2): 42-45. (LI Guojie. Analysis on Huludao waterlogging traffic influence based on SWMM model [J]. China Water Power & Electrification, 2018, 155(2): 42-45. (in Chinese))
- [45] ONG G P, FWA T F. Wet-pavement hydroplaning risk and skid resistance: modeling [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(10): 590-598.
- [46] HUANG Y, DONG W J, ZHI R, et al. Brief research on economic impact assessment model for Shanghai urban transportation under durative extreme precipitation [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(4): 803-812.
- [47] PREGNOLATO M, FORD A, WILKINSON S M, et al. The impact of flooding on road transport: a depth-disruption function [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 55(8): 67-81.
- [48] PHANSE S, CHATURVEDI M, SRIVASTAVA S. Modelling and simulation of road traffic under rainy conditions [C]//2022 14th International Conference on Communication Systems and Networks. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2022: 830-835.
- [49] 李雯,姜仁贵,解建仓,等. 基于系统动力学的城市内涝灾害应急管理模型[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 51-57. (LI Wen, JIANG Rengui, XIE Jiancang, et al.

- Emergency management model of urban waterlogging disaster based on system dynamics [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(5): 51-57. (in Chinese))
- [50] TANNER J C. Effect of weather on traffic flow [J]. *Nature*, 1952, 169(4290): 107.
- [51] NIGAM A, SRIVASTAVA S. Macroscopic traffic stream variables prediction with weather impact using hybrid CNN-LSTM model [C]// 22nd International Conference on Distributed Computing and Networking, ICDCN 2021. New York: Association for Computing Machinery, 2021: 1-6.
- [52] GUPTA A, BANSAL A, GUPTA R, et al. Urban waterlogging detection and severity prediction using artificial neural networks [C]// 2017 IEEE 19th International Conference on High Performance Computing and Communications. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2017: 42-49.
- [53] WU X, CAO Y, XIAO Y, et al. Finding of urban rainstorm and waterlogging disasters based on microblogging data and the location-routing problem model of urban emergency logistics [J]. *Annals of Operations Research*, 2020, 290(1/2): 865-896.
- [54] 李欣. 城市交通道路网络抗涝韧性定量评价方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [55] 董洁霜, 吴雨薇, 路庆昌. 降雨条件下城市道路网络拓扑结构脆弱性分析 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(5): 109-113. (DONG Jieshuang, WU Yuwei, LU Qingchang. Road network topology vulnerability identification considering the intensity of rainfall in urban areas [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(5): 109-113. (in Chinese))
- [56] SOHN J. Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: an accessibility approach [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2006, 40(6): 491-506.
- [57] TANG X, CHEN Y. The evaluation of the road network reliability under the rainfall weather [C]// Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable; Proceedings of the 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals. Beijing: ICCTP, 2010: 1104-1113.
- [58] SU B, HUANG H, LI Y. Integrated simulation method for waterlogging and traffic congestion under urban rainstorms [J]. *Natural Hazards*, 2016, 81(1): 23-40.
- [59] BRILON W, PONZLET M. Variability of speed-flow relationships on German Autobahns [J]. *Transportation Research Record*, 1996, 1555(1): 91-98.
- [60] 曾伟良, 龚峻峰, 何兆成, 等. 降雨对城市道路交通行驶速度的影响分析 [J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(增刊 2): 201-205. (ZENG Weiliang, GONG Junfeng, HE Zhaocheng, et al. Analysis of rainfall impact on urban road traffic speed [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 34(Sup2): 201-205. (in Chinese))
- [61] 李铁强, 马荣国, 裴晓云, 等. 基于 ADAMS/Car 的雨天道路行车安全评估 [J]. *河北工业大学学报*, 2012, 41(5): 78-83. (LI Tieqiang, MA Rongguang, PEI Xiaoyun, et al. Traffic safety assessment of rainfall weather based on ADAMS/Car [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2012, 41(5): 78-83. (in Chinese))
- [62] ZHANG W H, YAN R, FENG Z X, et al. Study of highway lane-changing model under rain weather [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(6): 188-196.
- [63] MANLEY E, CHENG T, PENN A, et al. A framework for simulating large-scale complex urban traffic dynamics through hybrid agent-based modelling [J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2014, 44: 27-36.
- [64] 赵晓华, 任贵超, 陈晨, 等. 不良天气下驾驶行为研究综述 [J]. *交通信息与安全*, 2017, 35(5): 70-75. (ZHAO Xiaohua, REN Guichao, CHEN Chen, et al. A review on driving behavior under adverse weather conditions [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2017, 35(5) 70-75. (in Chinese))
- [65] 赵炜华, 边浩毅, 叶飞. 降雨强度对驾驶人视认距离的影响研究 [J]. *公路与汽运*, 2015, 171(6): 44-48. (ZHAO Weihua, BIAN Haoyi, YE Fei. Study on the influence of rainfall intensity on drivers' perceived distance [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2015, 171(6): 44-48. (in Chinese))
- [66] HAN Z, SHARIF H O. Investigation of the relationship between rainfall and fatal crashes in Texas, 1994-2018 [J]. *Sustainability*, 2020, 12(19): 76-79.
- [67] 王超, 许洪国, 刘兆惠. 基于灰关联的降雨环境下交通安全影响因素的分析 [C]// Proceedings of 2010 The 3rd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (Volume 5). Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2010: 89-92.
- [68] DHALIWAL S S, WU X, THAI J, et al. Effects of rain on freeway traffic in Southern California [J]. *Transportation Research Record*, 2017, 2016(1): 69-80.
- [69] 赵亮, 刘浩学, 王磊, 等. 恶劣天气下驾驶人生理反应与行车安全关系 [J]. *中国公路学报*, 2016, 29(11): 147-152. (ZHAO Liang, LIU Haoxue, WANG Lei, et al. Relationship between driver's physiological reaction and driving safety in bad weather [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(11): 147-152. (in Chinese))
- [70] ZHU J, DAI Q, DENG Y, et al. Indirect damage of urban flooding: investigation of flood-induced traffic congestion using dynamic modeling [J]. *Water*, 2018, 10(5): 622. (收稿日期: 2022-11-10 编辑: 王芳)