

李俊奇, 汪辉, 李小静, 等. 城市洪涝条件下车辆失稳风险阈值及判别标准研究进展[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 30-45. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.003

LI Junqi, WANG Hui, LI Xiaojing, et al. Research progress on vehicle instability risk threshold and discriminant criteria under urban flooding condition[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 30-45. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.003

城市洪涝条件下车辆失稳风险阈值及判别标准研究进展

李俊奇^{1,2}, 汪辉^{1,2}, 李小静^{1,2}, 王宇^{1,2}, 郭俊杰^{1,2}, 杨程远^{1,2}

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044)

摘要:【目的】随着城市化进程的加速和极端气候事件的频发, 城市洪涝事件日趋严峻, 积水路段中的车辆失稳风险也在逐步增加。研究车辆在积水中的失稳风险阈值, 对于洪涝风险评估和应急管理具有重要的理论意义和实用价值。【方法】从试验研究、理论分析和数值模拟三个方面系统总结了1967—2024年关于车辆在洪涝积水中失稳阈值的研究成果, 评估了依据单一水深/流速、水深流速组合、车辆特征和水动力等因素为现有车辆失稳判别标准的优缺点。【结果】现有水槽试验考虑的影响因素较为有限, 足尺试验和非静态车辆的研究较少, 有些理论分析缺乏数据的率定验证, 部分数值模拟中的水动力模型未进行参数敏感性分析。阈值未充分考虑车辆状况、行驶条件、道路环境等多方面因素。失稳判别标准主要依赖于车辆动力学参数, 具有一定的经验性。【结论】未来需对不同类型足尺车辆进行多因素耦合研究, 并结合数值模拟, 利用机器学习算法分析试验数据, 提高洪涝条件下车辆稳定性阈值模型的准确性, 制定车辆安全标准。为交通部门和排水系统规划建设部门提供决策依据。

关键词: 城市洪涝; 车辆失稳; 风险阈值; 判别标准; 气候变化; 降雨; 径流; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.003

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)03-0030-16



Research progress on vehicle instability risk threshold and discriminant criteria under urban flooding condition

LI Junqi^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, LI Xiaojing^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, GUO Junjie^{1,2}, YANG Chengyuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: [Objective] With the acceleration of urbanization and the frequent occurrence of extreme weather events, urban

收稿日期: 2024-11-20; 修回日期: 2024-12-28; 录用日期: 2024-12-30; 网络出版日期: 2025-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52370093)

作者简介: 李俊奇(1967—), 男, 教授, 博士, 主要从事城市雨水控制利用与海绵城市研究。E-mail: lijunqi@bucea.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

flooding events are becoming more and more severe, and the risk of vehicle instability in waterlogged road sections is gradually increasing. The study of vehicle instability risk thresholds in waterlogged roads is of great theoretical significance and practical value for flood risk assessment and emergency management. [Methods] The research result on vehicle instability thresholds in flooded water from 1967 to 2024 are systematically summarized from experimental studies, theoretical analyses, and numerical simulations, and the advantages and disadvantages of basing on a single water depth/flow velocity, a combination of water depth and flow velocity, vehicle characteristics, and hydrodynamics as the existing vehicle instability discriminatory criteria are evaluated. [Results] Existing flume tests consider more limited influencing factors, less research on foot-scale tests and non-static vehicles, some theoretical analyses lack rate verification of data, and some hydrodynamic models in numerical simulations do not carry out parameter sensitivity analyses. The threshold value does not fully consider the vehicle conditions, driving conditions, road environment and other factors. The destabilization criterion mainly relies on vehicle dynamics parameters, which is somewhat empirical. [Conclusion] In the future, it is necessary to carry out multi-factor coupling research on different types of foot-size vehicles, and combined with numerical simulation, use machine learning algorithms to analyze the experimental datum, to improve the accuracy of the vehicle stability threshold model under flooding conditions, and to formulate vehicle safety standards. To provide a decision-making basis for the transportation department and the drainage system planning and construction departments.

Keywords: urban flooding; vehicle instability; risk threshold; discriminate criteria; climate change; rainfall; runoff; influence factors

0 引言

近年来,在全球气候变暖和城镇化快速发展的双重影响下,极端降雨事件不断增加,城市流域中不透水面积不断扩大,城市洪涝灾害问题日益严重^[1]。当人、车辆或建筑物处于洪水路径中时,很容易被冲走或冲毁,造成大量伤亡和财产损失。《中国水旱灾害防御公报 2020》统计数据显示,1991—2020年,中国年均因洪灾死亡或失踪人数达到2 020人,共死亡6万余人,年均直接经济损失达1 604亿元,总额约4.81万亿元^[2]。2021年7月18—21日,郑州遭遇历史罕见特大暴雨,造成大量人员伤亡和车辆受损,因灾死亡失踪380人,受损车辆40余万辆,直接经济损失达409亿元^[3]。2023年7月29日至8月2日,北京23·7特大暴雨造成全市死亡33人,近129万人受灾,房屋倒塌5.9万间。此次流域性特大洪水发生后,中央财政增发2023年国债1万亿元,集中力量支持灾后恢复重建和弥补防灾减灾救灾短板,重中之重是系统推进防洪减灾工程,整体提升我国抵御自然灾害的能力^[4]。

在城市洪涝条件下,失稳车辆不仅会危及驾驶者和乘客安全,还可能撞击行人从而产生安全威胁。同时,失稳车辆可能会破坏市政公共设施、建筑物,堵塞桥涵洞口及救援通道等。此外,失稳车辆冲入城市河道还可能增加堤坝等水工建筑物溃决的风险^[5]。相关研究表明,车辆在洪涝条件下的失稳危险程度主要受到以下因素的影响:水深、流速、道路坡度、来

流方向、流态、载荷、车辆状况(车型、尺寸、重量、密封性、手刹模式、轮胎状况、水动力设计、离地间隙等)以及道路粗糙度等^[6-13]。伴随城市交通不断发展的过程中,车辆失稳防范技术面临着多维度的严苛需求,如何将车辆失稳阈值应用于不同车型中,进行实时信息交互、动态化评估、精准化预警以及智能化救援决策,并精准适配多样路况与交通方式协同就显得至关重要,而现有研究多集中于模型车试验和数值模拟,未充分考虑不同车型构造、行驶条件、道路环境等多方面因素,所得阈值很难直接作为真实车辆行驶中的失稳判别准则,亟需对现代车辆进行多因素耦合试验并结合大数据、人工智能等前沿技术进一步深入研究。

从CNKI和web of science(WOS)数据库中以洪涝、车辆失稳、风险阈值等关键词进行检索,去除完不相关文献,得到51篇文献,如图1所示。通过Cite Space对这些文献的关键词进行可视化计量分析,生成了10个关键词聚类,其中“车辆失稳”“模型”“洪涝风险”等关键词交叉最多,是当前的研究的热点内容,如图2所示。关键词时空演化图(见图3)可以显示2011—2024年中不同时间段每个聚类里关键词的发展情况,发现国内外学者从气候变化逐步转向洪涝风险管理,随后从洪涝风险管理走向车辆失稳、数值评估、道路交通、疏散、流体力学等多学科交叉研究。图4为样本文献生成的突显词图谱,从突显词可以看出近几年“车辆稳定性”“洪涝风险”“标准”等方面的研究开始兴起并持续,侧面也反映

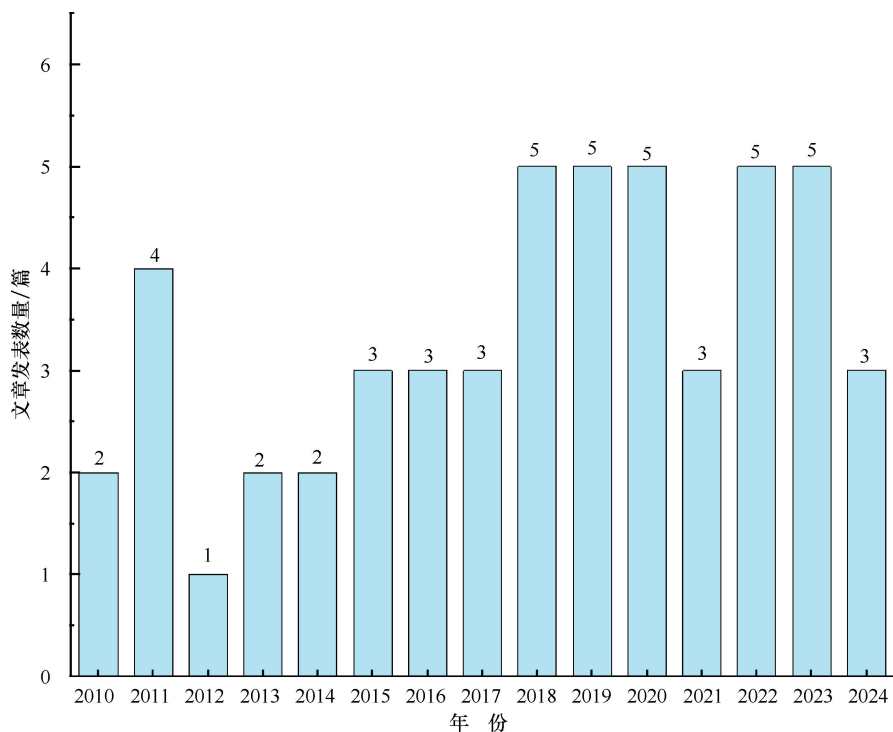


图1 近年关于洪涝作用下车辆失稳风险发表的文章数量

Fig. 1 Number of articles published in recent years on vehicle instability risk under the action of flooding

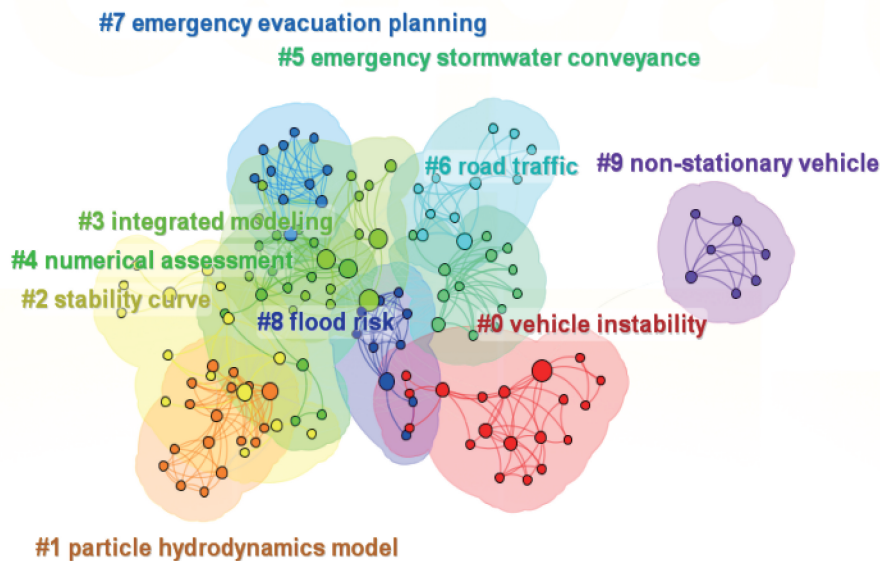


图2 关键词聚类图

Fig. 2 Keyword clustering chart

当前韧性城市发展的客观需要。

通过文献计量分析得知近年来车辆失稳阈值及判别标准研究已经成为国内外洪涝风险评估领域的热点问题之一, 其也是开展城市洪涝致灾机理及逃生避险决策等研究的重要依据。本文首先从试验研究、理论分析和数值模拟三个方面系统总结了近年来车辆在洪

涝积水中失稳阈值的研究成果, 依据单一水深/流速、水深流速组合、车辆特征和水动力等因素, 总结了现有车辆失稳判别标准的优缺点。提出当前该领域的关键技术问题, 最后给出未来研究的趋势和方向, 以期为城市交通、应急管理和排水系统规划建设部门提供决策依据, 提高城市防灾减灾能力, 增强城市安全韧性。

1 洪涝条件下车辆失稳风险阈值的研究现状

城市洪涝条件下车辆失稳一般分为三种模式: 漂浮、滑动和倾倒入失稳。倾倒入失稳是 HYDRO (2005)^[14] 首次提出, 通常发生在车辆已经漂浮或者滑动且遇到不平坦地形的车辆。因此, 这种形式的不稳定性一般不作为主要分析对象^[15]。对于静态车辆, 当所受浮力与升力的合力超过车辆重力时(注: 亚临界流态下通常不考虑升力), 车辆会发生漂浮失稳, 表示为

$$F_G < F_B + F_L \quad (1)$$

式中, F_G 为车辆的重力(N); F_B 为车辆受到的浮力(N); F_L 为车辆受到的升力(N)。

当绕流阻力和横向力的合力超过摩擦力时, 则会发生滑动失稳, 表示为

$$F_R < F_D + F_T \quad (2)$$

式中, F_R 为车辆受到的摩擦力(N); F_D 为水流绕流阻力(N); F_T 为车辆受到的横向力(N)。

对于运动车辆, 漂浮失稳的机制与静态车辆类似。当阻力超过摩擦力和驱动力, 非静止汽车

在平坦路面上会发生滑动失稳^[12], 表示为

$$F_D > F_R + F_{RO} + F_{DV} \quad (3)$$

式中, F_{RO} 为车辆受到的滚动阻力(N); F_{DV} 为车辆的驱动力(N)。

一般来说, 水流对汽车产生的作用力可分为两

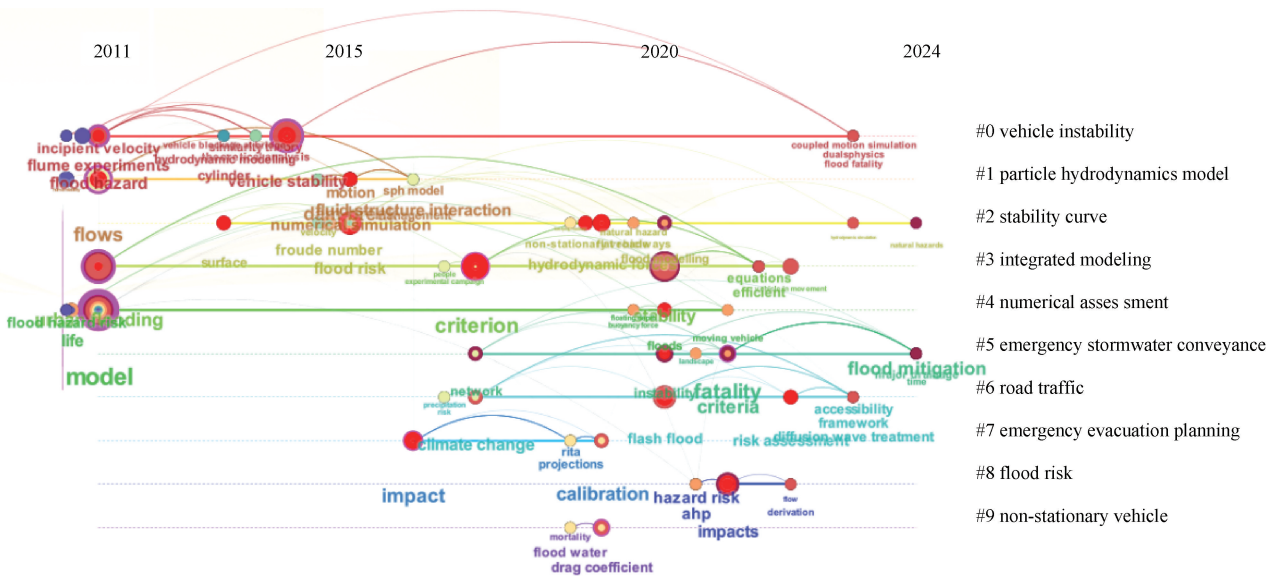


图3 关键词时空演化图

Fig. 3 Keyword spatio-temporal evolutionary chart

Top 21 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2010—2024
incipient velocity	2011	1.48	2011	2015	
flows	2011	1.41	2011	2013	
scale ratio	2011	0.98	2011	2015	
flood hazard	2011	0.87	2011	2013	
flume experiments	2011	0.78	2011	2015	
urban flooding	2011	0.7	2011	2013	
surface	2013	1.16	2013	2015	
dam break	2015	1.15	2015	2017	
numerical simulation	2015	1.15	2015	2017	
impact	2016	0.8	2016	2021	
hydrodynamic forces	2019	1.16	2019	2021	
non-stationary vehicle	2019	1.02	2019	2021	
criterion	2017	1.51	2020	2023	
flash flood	2020	1.3	2020	2021	
vehicle stability	2014	1.2	2020	2021	
impacts	2021	1.09	2021	2023	
floods	2020	0.99	2020	2021	
vulnerability	2020	0.99	2020	2021	
instability	2020	0.79	2020	2021	
risk assessment	2022	0.96	2022	2024	
flood risk	2015	0.51	2022	2024	

图4 关键词突显图

Fig. 4 Keyword highlighting chart

部分。一部分是水平方向的力，一部分是垂直方向的力。图5为车辆在洪涝积水中的受力情况。

车辆在流动的水中会受到多种水动力，以及与地面接触而产生的反作用力。静态和运动的车辆的水动力组合不同，表1描述了这些水动力的含义及影响因素。

从1967年开始，关于洪涝积水中车辆的稳定性研究开始探索，1973年进一步修正，在1993年展开了理论分析，然而在1993—2010年相关研究相对较少。自2010年之后，学者们再次对这一领域进行大量研究。以下从水槽试验、理论分析和数值模拟三方面总结和讨论。

1.1 水槽试验

水槽试验能够比较直观和准确的观察车辆在洪涝积水作用下的失稳状态。其通常在受控环境下进行，通过模拟不同的水深、流速和车辆条件，观察其稳定性表现。表2总结了国内外学者水槽试验研究的装置和工况条件等。1967年，BONHAM等^[16]首次进行了水槽试验研究，使用比例1:25的福特猎鹰汽车模型探究垂直于水流方向的静态车辆稳定性，认为轮胎和路面的摩擦系数 $\mu = 0.3$ ，但是在之后学者的试验中认为这个值是不够准确的^[9]。试验结果发现，在水深0.57 m时，车辆发生漂浮失稳。随后，GORDON等^[17]使用1:16比例的Morris miniature汽车模型，研究了车辆在三种工况(前轮锁定、后轮锁定、前后轮都锁定)下的稳定性，摩擦系数 μ 在0.3~1.0之间，结果发现前轮锁定比后轮锁定的稳定性高一些，这种现象可能是因为发动机一般位于汽车的前端。不同材质特征的路面会有不同的表面粗糙度，进而影响摩擦系数，SHAH等^[18-19]设计试验平台的平均曼宁粗糙度为0.017，保证水槽与沥青路面的表面粗糙度几乎一致。这些研究对于车轮摩擦系数大多选择经验值，而车辆在洪涝积水中轮胎与地面之间相互作用

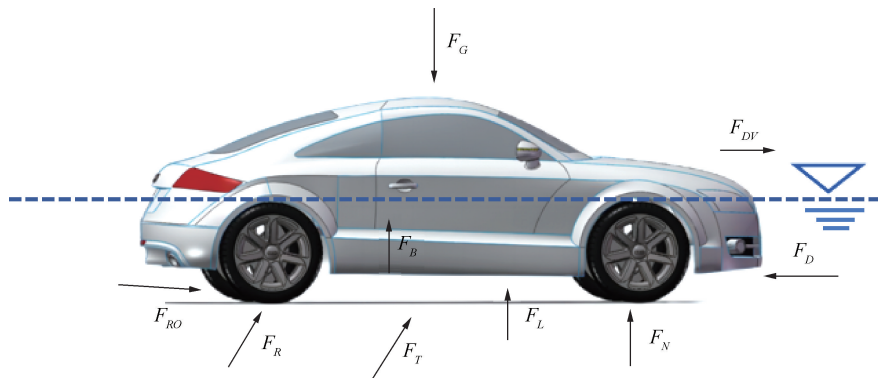


图5 车辆在水中的受力分析

Fig. 5 Force analysis diagram of vehicle in water

表1 部分淹没的静态和运动车辆的水动力

Table 1 Hydrodynamics of partially submerged static and moving vehicles

力	表达式	参数含义	影响因素
浮力 F_B	$F_B = \rho g V$	ρ 为水的密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); g 为重力加速度; V 为车辆排开水的体积 (m^3)	浮力随深度的增加而增加
绕流升力 F_L	$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A_L v^2$	C_L 为竖直方向绕流升力系数; A_L 为车辆的垂直投影面积 (m^2); v 为流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	取决于流经物体上、下压强差
摩擦力 F_R	$F_R = \mu F_N = \mu (F_G - F_B - F_L)$	μ 为摩擦系数; F_N 为地面对汽车的支持力 (N); F_G 为车辆重力 (N)	主要取决于摩擦系数
绕流阻力 F_D	$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_D v^2$	C_D 为绕流阻力系数; A_D 为汽车淹没部分垂直于流动方向的投影面积 (m^2)	随着速度、流体密度和物体大小而增加
横向力 F_T	$F_T = \frac{1}{2} \rho C_D A_T v^2$	C_D 为绕流阻力系数; A_T 为车辆平行于流向的淹没部分的投影面积 (m^2)	随流速、流体密度增加而增加
驱动力 F_{DV}	$F_{DV} = \frac{F_G (v_f - v_o)}{gt}$	v_f 为最终车辆速度; v_o 为初始车辆速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); t 为车辆穿过被淹没道路所需的时间 (s)	主要取决于车辆的净重和车速
滚动阻力 F_{RO}	$F_{RO} = \mu_{RO} F_G$	μ_{RO} 为滚动阻力系数	由车辆净重、轮胎与地面之间的接触情况决定

是一个复杂的过程, 积水会改变轮胎与地面的摩擦系数, 并且随着车辆行驶速度、积水深度、地面状况等因素的变化而变化, 无法精确模拟不同工况下轮胎与地面附着力的动态变化, 所得阈值具有一定局限性。

当发生极端天气下, 洪涝积水可能会完全淹没车辆, 因此试验需要考虑部分淹没和完全淹没的车辆在不同影响因素下的稳定性, TEO 等^[20]对此研究分析了不同的水槽宽度、来流方向以及坡度对车辆稳定性的影响。当车辆部分淹没时, 初始运动所需的阈值速度跟水深是负相关, 当车辆完全淹没时, 阈值速度跟水流深度是正相关。对于部分淹没的车辆, SHU 等^[21]导出了基于力学的初始速度公式, 并且通过水槽试验来率定公式中 α 和 β (车的经验参数) 两个关键参数。值得一提的是, 试验测得车辆 (所有车轮锁定) 的漂浮水深阈值在 0.56 ~ 0.63 m, 高于 GORDON^[17] 或 KELLER 等^[22] 提出的临界漂浮深度, 这可能是因为车辆类型不同和车轮制动条件不同导致的结

果。XIA 等^[23]研究了不同地面坡度对车辆失稳阈值的影响。结果表明在相同的水深条件下, 倾斜地面上的初速度将低于平坦地面上的相应值。

阻力系数和升力系数是计算车辆水动力学中的重要参数, TODA 等^[7]在试验中首次考虑了汽车孔隙率和载荷的影响, 并在水动力的分析中增加了升力。OSHIKAWA 等^[24]通过水槽试验分别评估了阻力和升力系数 C_D 和 C_L , 得到紧凑型四轮驱动轿车的阻力系数和升力系数范围值。SMITH 等^[9]测量了部分淹没车辆的阻力系数, 其适用于亚临界、超临界和近临界流的一系列流动条件, 填补了之前试验的一项空白。但目前研究对于完全和部分淹没的车辆, C_D 和 C_L 的评估仍没有得到很好的量化, 需要对这些系数进行更可靠的评估。

由于比例模型车辆的局限性, 近年来, 国外有些学者开始使用足尺车辆来探究汽车在洪涝条件下的稳定性。KRAMER 等^[8]对此进行了足尺试验研究水的

来流角度对车辆稳定性的影响, 试验结果表明原型车的漂浮水深高于模型车, 这可能是因为模型车和原型车之间的密封性差异导致的。SMITH 等^[9]对三种类型的原型车辆进行了全面的稳定性试验, 对来流方向为 90° 的原型车辆的摩擦系数进行测量, 结果表明, 摩擦系数会根据地面条件而显著变化, 试验必须考虑最坏情况下的摩擦系数, 但是这项研究没有考虑到坡度的影响。AL-QADAMI 等^[10]展开了真实车辆在 90° 和 0° 两个方向, 并在静态和运动两种情况下的测试。试验结果表明: 在两种情况下, 90° 的方向都是临界方向, 与静态车辆相比, 运动中的车辆在滑动不稳定性方面更加稳定, 但仅限于亚临界流态, 并未涉及对超临界流态下的研究。足尺试验能够很好的补充和验证比例模型车辆试验和数值建模的结果, 但现有研究都在实验室理想条件下进行的, 无法模拟真实道路洪涝条件下车辆失稳情景, 所提出的阈值相对也较为保守, 且考虑影响因素相对较少, 如坡度、流态、汽车类型等, 未来可考虑在室外环境进一步展开研究。

之前的学者对洪涝积水中车辆不稳定性的研究仅针对静态车辆, 但在现实中往往是因为在行驶过程中突遇道路洪涝积水导致车辆失稳。针对洪涝积水中移动车辆的水动力响应, SHAH 等^[25]基于滑动平衡力学理论和试验分析了部分淹没条件下非静态车辆的初速度公式。但是并未考虑到道路坡度的影响, 随后 SHAH 等^[11]弥补了这一缺陷, 给出了车辆在倾斜路面时的失稳判别准则。对于非静态车辆的研究, 还需要考虑更多的道路坡度、来流角度、流态等影响因素, 同时也可以探讨车辆曲线行驶的稳定性。

目前大量水槽试验研究已被用于建立不同的车辆稳定性模型。然而, 试验数据和稳定性模型样本离散度过大, 可能与车辆之间的差异性有关, 如图 6 所示。除此之外, 水槽与真实道路洪涝条件存在很大的差异性, 大多数试验研究都是通过比例模型进行, 对相关影响因素(道路坡度、来流方向、密封性、流态、车辆类型等)考虑不充分, 且关于足尺和非静态车辆的研究涉及尚少, 后续需进一步展开深入研究。

1.2 理论分析

早期, 部分学者通过对洪涝积

水中车辆的水动力平衡进行理论分析来研究其稳定性。KELLER 等^[22]是最早采用这种方法的研究者, 通过分析车辆的垂直和水平反作用力, 假设摩擦系数 μ 为 0.3, 阻力系数值为 1.1(车轮上)和 1.15(车身上), 推导出了洪涝积水中车辆的阈值速度公式。然而, 其结果未经实际试验验证。随后, XIA 等^[30]根据滑动平衡的力学条件, 推导了一个预测被淹车辆初始速度的公式, 并使用 TEO 等^[20]的试验结果验证了公式的精度。果鹏等^[31]结合抛石落距和一维碰撞双自由度力学模型, 分别推导出车辆滑移速度和最大撞击力公式, 并通过水槽试验率定了关键参数。

通过建立数学模型、拟合试验数据并进行敏感性分析, 研究人员为车辆稳定性评估提供了多种方法。PREGNOLATO 等^[32]通过将水深和流速的关系曲线拟合到视频分析中, 建立了洪水深度破坏函数, 并辅以现有文献中的数据进行率定。MILANESI 等^[33]开发了一个受流量影响的车辆稳定性无量纲概念模型, 并考虑了坡度的作用。通过拟合文献中的试验数据, 估计升力和阻力系数的最佳值, 以计算车辆的稳定性阈值。

脆弱性评估是判断车辆失稳的有效方法。BO-CANEGRÁ 等^[34-35]通过部分淹没车辆的稳定性函数、车辆的几何特性、水流要素(水深和速度)以及洪水发生的概率来确定危险性, 最后结合车辆危险性和脆弱性来估计车辆不稳定风险。其中车辆稳定性函数

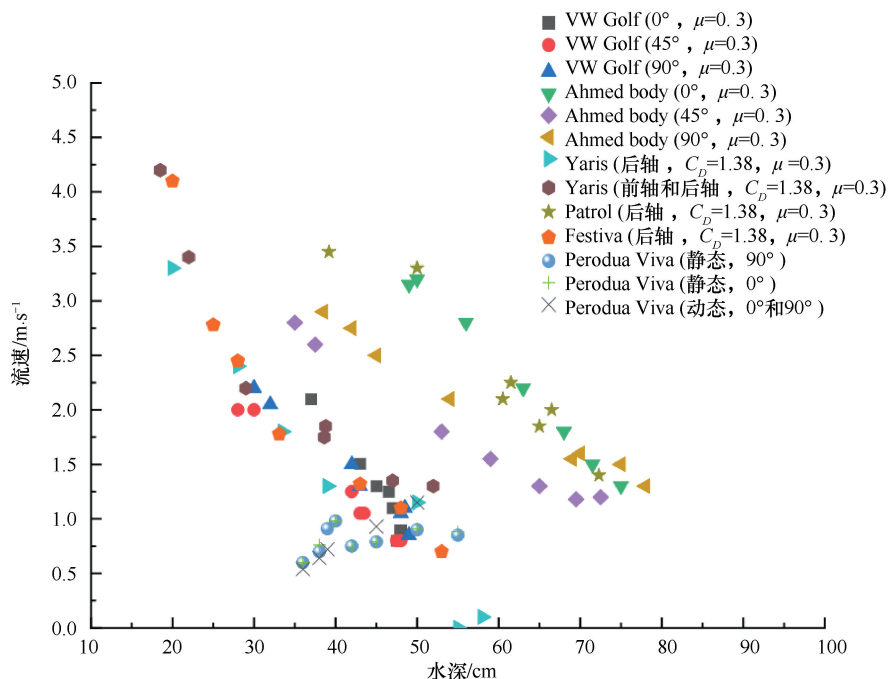


图 6 洪涝积水中足尺车辆失稳的试验数据汇总^[8-10]

Fig. 6 Summary of experimental data on instability of foot-size vehicles in flooded water

表2 水中车辆失稳的试验总结

Table 2 Experimental summary of vehicle instability in water

研究者	年份	研究方法	试验对象	比例	离地同隙/m	淹没程度	装置尺寸	装置材质	水深/m	流速 /m·s ⁻¹	来流方向	坡度	拟定摩擦系数	漂浮水深/m
BONHAM et al ^[16]	1967	试验	Ford falcon	1 : 25	0.18	部分淹没	—	—	0.11~0.57	0.48~3.09	90°	平坦	0.3	0.57
GORDON et al ^[17]	1973	试验	Morris Mini sedan	1 : 16	0.15	部分淹没	—	—	0.12~0.57	0.5~3.69	0°	平坦	0.3~1	后部 0.42 前部 0.5
TEO et al ^[20]	2010	试验	MINI Cooper; BMW M5; Mitsubishi Pajero	1 : 43; 1 : 18	0.149; 0.117; 0.225	部分淹没和完全淹没	长 10 m、宽 0.3 m、高 0.3 m; 长 10 m、宽 1.2 m、高 0.3 m	水平床为粗糙表面, 两侧为玻璃	0.645~4.816	2.37~7.94	0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°	1 : 100、1 : 200、1 : 300、1 : 1 000	—	—
SHU et al ^[21]	2011	试验	Ford Focus, Ford Transit, Volvo XC90	1 : 18	0.10; 0.166; 0.218	部分淹没	长 15 m、宽 1.2 m、高 1 m	底部为塑料地毯, 两侧为玻璃	0.16~0.62	0.18~6.24	0°, 180°	平坦	0.39 (Ford Transit), 0.50 (Ford Focus) 和 0.68 (Volvo XC90)	0.56~ 0.63
肖宣炜等 ^[26]	2013	试验及理论	Honda Accord, Audi Q7	1 : 14, 1 : 24	0.155; 0.206	部分淹没	长 60 m、宽 1.5 m、高 1 m	底部为水泥砂浆粉面	0.19~0.7	0.5~6	90°, 180°	平坦	0.42~ 0.51~0.78 (干燥条件), 0.39~0.68(湿润条件)	0.48 (Honda Accord), 0.66~ 0.70 (Audi Q7)
TODA et al ^[7]	2013	试验	Tipo Sedan, Tipo Minivan	1 : 10, 1 : 18	—	部分淹没	长 10 m、宽 1 m	砂浆	0.30~0.69 (Sedan) 0.43 ~1.21 (Mini- van)	1.05~2.00 (Sedan); 1.24~2.35 (Minivan)	0°, 45°、 90°	平坦	0.073 ~ 0.65	Tipo Sedan: V> 2.0, D> 0.5
XIA et al ^[23]	2013	试验及理论	Honda Accord, Audi Q7	1 : 14, 1 : 24	0.155; 0.206	部分淹没	长 60 m、宽 1.5 m	底部为水泥层, 两侧为玻璃	0.18~0.55	1.4~5.4	0°, 90°、 180°	1 : 50; 1 : 100	(0°): 0.25, (90°): 0.75	0.45 (Honda) 0.67 (Audi)
OSHIKAWA et al ^[24]	2014	试验	Nissan March, Toyota Land Cruiser	1 : 24	0.157; 0.235	部分淹没	长 14 m、宽 0.6 m、高 0.6 m	—	0~0.72 (Nissan March); 0~1.08 (Toyota Land Cruiser)	0~7.3 (Nissan March); 0~3.91 (Toyota Land Cruiser)	90°	1 : 50; 1 : 100	0.4~0.6	0.31, 0.57
KRAMER et al ^[8]	2016	试验	VW Golf III, LF 10/6	1 : 1, 1 : 9.8, 1 : 13	—	部分淹没	长 20 m、宽 1 m、高 0.6 m; 长 20 m、宽 1 m、高 0.6 m	钢制; 底部为水泥层, 两侧为玻璃	0.27~0.49 (VW Golf III); 0.35~ 0.79 (LF 10/6)	0~2.2 (VW Golf III); 0~3.2 (LF 10/6)	0°, 45°、 90°	平坦	0.3	0.57~ 0.63 (1 : 1) 0.45 (1 : 9.8), 0.73 (1 : 13)
肖学等 ^[27]	2017	试验	Polo, Jetta, Audi Q5	1 : 18	0.108; 0.120; 0.185	部分淹没	长 7 m、宽 1.2 m、高 0.3 m; 长 0.18 m、宽 0.31 m、高 0.20 m	玻璃	0~0.55	0~6.5	0°, 90°、 180°	0%, 8%、 15%	0.638 (干燥条件), 0.427 (湿润条件)	—

表 2(续)

研究者	年份	研究方法	试验对象	比例	离地间隙/m	淹没程度	装置尺寸	装置材质	水深/m	流速 /m·s ⁻¹	来流方向	坡度	拟定摩擦系数	漂浮水深/m
MARTINEZ-GOMARIZ et al ^[28]	2017	试验	12 种不同的汽车模型	1 : 14, 1 : 18, 1 : 24	0.084; 0.126; 0.12; 0.154; 0.154; 0.168; 0.162; 0.168; 0.182; 0.18; 0.224; 0.252; 0.28	部分淹没	长 20 m、 宽 0.6 m、 高 0.6 m	底部为胶木床, 两侧为玻璃	0.4~0.68	0~5.0	所有方向	平坦	0.52~ 0.62	0.387~ 0.686
SHAH et al ^[18-19]	2018	试验	Volkswagen Scirocco R	1 : 24	0.121	部分淹没	长 10 m、 宽 0.3 m、 高 0.45 m	水泥	0.031~ 0.058 2	0.22~0.52	0°~360° (45°变化一次)	平坦	0.3	0.042
SHAH et al ^[25]	2018	试验	Perodua Viva	1 : 10	0.18	部分淹没	装置 27 m× 12 m, 试验区域 5 m ×4.25 m	底部为沙土, 两侧为水泥	0.039~0.083	0.25~0.60	90°	平坦	0.52, 滚动摩擦系数为 0.092	0.047
SMITH et al ^[9]	2019	试验	Toyota Yaris Sedan, Nissan Patrol GR11, Ford Festiva	1 : 1, 1 : 18	0.155; 0.50; 0.215	部分淹没	长 10 m、 宽 8 m、高 0.7 m; 长 10 m、 宽 7 m, 高 1.5 m	混凝土	0~1.0	0~8.6	90°	平坦	0.36~ 0.78	—
Al-QADAMI et al ^[10]	2021	试验	Perodua Viva	1 : 1	0.18	部分淹没	长 12 m、 宽 10 m、 高 1.5 m	混凝土	0~0.55	0.54~1.15	0°, 90°	平坦	0.32, 滚动摩擦系数为 0.12	0.4
HU et al ^[29]	2023	试验	Polo GTI, Audi A6L, Range Rover	1 : 18	0.117; 0.139; 0.213	部分淹没	长 10 m、 宽 0.4 m、 高 0.8 m	两侧为玻璃	0.030~0.065 (Polo GTI), 0.035~0.080 (Audi A6L), 0.040~0.090 (Range Rover)	0.137~0.289 (Polo GTI), 0.128~0.245 (Audi A6L), 0.154~0.386 (Range Rover)	0°~180° (15°变化一次)	平坦	0.25, 0.50, 0.75	0.359, 0.378, 0.459

是根据 ARRIGHI 等^[6]提出的无量纲参数 θ_{vi} 和 θ_{vcr} 定义的, 充分考虑了弗劳德数、车辆密封性、离地间隙以及车辆类型等因素, 适用于任何车辆。

在综合评价中运用信息论的求解权重也是一种评估车辆失稳的方法。GUO 等^[36]用熵值法估算城市洪涝积水中车辆的失稳条件, 基于 SHANNON 和 TALLIS 熵概念, 导出了受淹车辆初始速度与水深关系的表达式, 以文献中的试验数据进行了敏感性分析, 但所提出的熵方法有其局限性, 未考虑来流角度对水淹车辆水动力不稳定性的影响。

这些理论分析对不同车辆类型在洪涝积水中的动态变化适用性不强, 需要拟合大量试验数据进行率定验证, 而这些参数与车辆空气动力学外形、轮胎类型和路面粗糙度等影响因素密切相关。因此, 理论分析必须要与水槽试验结合分析才能得到更可靠的结果。

1.3 数值模拟

近年来, 数值模拟方法在研究洪涝积水中车辆失稳特性方面展现了巨大的潜力。目前的研究方法主要可分为两类: 一是采用二维水动力模型, 二是采用计算流体动力学(CFD)软件。通过使用水动力模型以及 CFD 软件, 能够模拟和分析复杂的水动力学现象, 并提出量化的风险评估指标。

一开始用数值模拟的方法来研究洪涝积水中车辆稳定性的是 XIA 等^[37-38]采用二维水动力模型, 并通过有限体积法(FVM)来求解基于非结构化三角网格的控制方程。之后引入了危险度(HD)表达式, 用来量化相应的危险程度。TEO 等^[39-40]用数值模型研究不同重现期降雨下车辆的危险程度。DONG 等^[41]通过水动力模型详细讨论了人和车辆的淹没特征和危险度的时空变化, 并计算了郑州市特大洪涝灾害下京广

路北隧道(JRT)不同位置疏散时间的变化。CHAO等^[42]从街区尺度出发,通过数值模拟证实了城市街道布局对内涝的影响,并量化了街道布局对水中人车风险的影响。EVANS等^[43]分析了车辆和行人组合水深-流速稳定性函数,导出风险指标以量化洪涝积水对车辆乘员造成的风险。朱呈浩^[44]、梅超^[45]、WANG^[46]、DONG^[47]、任春娇等^[48]都通过一二维水动力模型模拟并结合人车失稳临界流速公式来评估人车失稳风险,且采用的失稳临界速度公式是XIA等^[23-49]推导出的。但是这种方法应通过试验进行验证,并进行模型参数的敏感性分析。

计算流体动力学(CFD)是基于纳维-斯托克斯方程描述流体的运动,是研究洪涝积水中车辆稳定性的有效手段。ARRIGHI等^[50-51]通过3D数值模型评估了发生初始运动时,作用在不同流态下部分淹没车辆的阻力和升力的贡献,并分析了其与弗劳德数的关系。AMICARELL等^[52]开发了3D平滑粒子流体动力学(SPH)数值方案,用于重现自由表面流(例如洪水、表面波)中的刚体传递。随后,ALBANO等^[53]验证并应用AMICARELLI等^[52]开发的SPH模型,研究了城市山洪期间防波堤对漂浮物(车辆等)冲刷的缓解影响,结果发现位于每个漂浮物上游和下游的防波堤可以有效地减轻其移动造成损害的风险。

CFD数值模拟结合试验研究可提高结果的准确性。GÓMEZ等^[54]使用Flow-3D进行数值模拟,并将模拟结果与试验结果进行了比较,发现两者结果吻合良好。AL-QADAMI等^[55]对被淹车辆的漂浮失稳进行了数值模拟,其中浮力深度 h_b 根据MARTÍNEZ-GOMARIZ等^[28]的研究进行了验证。随后首次采用Flow-3D模拟亚临界和超临界流态下移动和静态的全尺寸车辆的水动力,采用六自由度和全耦合技术,在每个时间步长的车辆质心位置来观察滑动和漂浮失稳^[56-57]。AZHAR等^[58]结合了实验室试验和数值模拟来评估车辆稳定性,使用SPH进行数值模拟,车辆的方向垂直于流动方向,结果证实了当前澳大利亚(AR&R, 2011)车辆安全标准^[15]。AL-QADAMI等^[59]采用三维数值模型来评估全尺寸乘用车在三个不同角度(即 0° 、 45° 和 90°)暴露于水流中的临界方向,并与SHAH等^[18]的试验进行对比,结果表明滑动失稳模式下车辆的临界方向为 90° ,车辆在 45° 的方向上往往更容易旋转。

在数值模拟中存在多方面的局限性与不足,包括参数选取与不确定性、敏感性分析欠缺、计算成本高、网格划分困难等问题,且模拟结果校准往往使用

模型车试验数据验证具有一定局限性,未来研究应考虑多种变量因素(如摩擦系数、车辆类型、来流方向、流态等)进行更多的数值建模,并辅以足尺试验数据进行验证,以确保模拟结果的可靠性和准确性。

2 洪涝条件下车辆失稳判别标准

洪涝条件下车辆是否失稳可通过多种指标进行判断,以下主要通过单一水深/流速,水深和流速组合,车辆特征和水动力学三方面总结了城市洪涝条件下车辆失稳判别标准,并分析了其优缺点。

2.1 以单一水深、流速为依据

水深(h)和流速(v)是评判道路洪涝条件下车辆失稳风险最直观、简便的指标。车辆漂浮失稳一般发生在低流速、高水深条件下;而滑动失稳一般发生高流速、低水深条件下。目前,有学者以单一水深或流速为依据研究了车辆的失稳判别标准,如表3所列。但是提出的标准都有一定的差异,这可能是跟车辆类型和水密性有关。

TODA等^[7]根据水槽试验得出的结论:若流速高于 2 m/s 且水深超过 0.5 m ,车辆可能发生失稳。OSHIKAWA等^[24]试验研究发现,紧凑型轿车比SUV更容易被冲走。当水深超过 0.31 m 且流速 2.0 m/s 时,小型车就会被冲走;而当水深到达 0.57 m 且流速相同的情况下,SUV才会被冲走。KRAMER等^[8]和AL-QADAMI等^[10]通过足尺试验得到真实车辆的漂浮失稳深度。刘非等^[60]采用一二维水动力耦合模型,按照最不利原则,分析了人车的失稳风险,得出当水深低于 0.15 m 或者流速低于 0.4 m/s 时为轻微风险。

以单一水深或流速为依据判别车辆失稳有一定的局限性,未能充分考虑水流要素和车辆自身特性的影响,不同类型的车辆其外形尺寸、质量分布和重心高度存在显著差异,且无法准确描述不同流态下洪水对车辆的冲击和侧向力作用,因此,这种判别依据具有一定的经验性。

2.2 以水深和流速组合为依据

洪涝条件下车辆稳定性可以通过多种指标进行评判,许多学者以水深和流速组合来量化和分类暴露在洪涝积水中车辆的失稳风险,如表4所列。2006年英国建筑行业研究与咨询协会(CIRIA, 2006)发布的手册通过水深和流速乘积来对车辆在洪涝积水中的失稳风险进行评级,主要将其分为低、中、高三等级。这种分类方法提供了一个简便的评估工具,用于不同程度的洪涝积水条件下的风险评估。SMITH等^[61-62]通过结合AEMI等^[63]的研究成果,绘制了综

表3 以单一水深、流速为依据的车辆失稳判别标准

Table 3 Vehicle instability discrimination criteria based on a single water depth and flow velocity

数据来源	水深/m	流速/m·s ⁻¹	风险等级
TODA et al ^[7]	>0.5	>2.0	漂 浮
OSHIKAWA et al ^[24]	≥0.31	≥2.0	滑 动(小型车)
	≥0.57	≥2.0	滑 动(SUV)
KRAMER et al ^[8]	0.57~0.63	—	漂 浮(SUV)
AL-QADAMI et al ^[10]	≥0.4	—	漂 浮(小型车)
刘非等 ^[60]	<0.15	<0.4	轻微风险

表4 以水深流速乘积为依据的车辆失稳判别标准

Table 4 Vehicle instability criterion based on the product of water depth and flow velocity

数据来源	水深×流速/m ² ·s ⁻¹	风险等级
	<0.1	低风险
英国 CIRIA C653 (2006) ^[64]	0.1~0.3	低风险
	0.3~0.6	中风险
	>0.6	高风险
澳大利亚降雨和径流-项目 10: 车辆的适当安全标准 (AR&R, 2011) ^[15]	≤0.3	安 全(小乘用车)
	≤0.45	安 全(大客车)
	≤0.60	安 全(大型四轮驱动车)
SMITH et al ^[61]	≤0.3	安 全
	0.3~0.6	中风险
	0.6~1.0	高风险
	1.0~4.0	极高风险

合洪水灾害曲线, 在不同的水深流速乘积范围内对行人行车的失稳风险进行了分类, 更加直观地展示了不同条件下的失稳风险。澳大利亚 AR&R 准则 (2011)^[15] 是保证车辆稳定性的重要参考, 该准则参考最早期的研究成果分别给出了小乘用车、大客车和大型四轮驱动车的失稳阈值。然而, 随着车辆设计的不断变化, 标准的灵活性不足, 无法考虑具有不同空气动力学外形的车辆。

除了常见的水深和流速乘积参数外, 一些新的指标来判断车辆失稳阈值具有很大的指导意义。KRAMER 等^[8] 发现一些常用的淹没道路通行安全标准仅考虑稳定性方面, 而忽略了车辆的任何技术限制, 因此提出了将总水头 ($h_E = h + v^2/2g$) 作为判断车辆失稳的依据。总水头的概念可以易于转化为实践, 适用性很好。最终将总水头为 0.3 m 和 0.6 m 推荐为客车和应急车的安全标准, 如图 7 和 8 所示。胡孝哲^[65] 通过模型车试验探究了汽车临界失稳状态与水深、流速的响应关系, 并绘制了不同工况的汽车稳定性曲面, 最后根据水流能量和动量守恒方程将水深 h 的平方与单位重量水流能量 H 的乘积 (h^2H) 作为径流行泄道路的车辆失稳风险指标, 并将风险划分为安

全、低、中、高四个等级, 如图 9 所示。

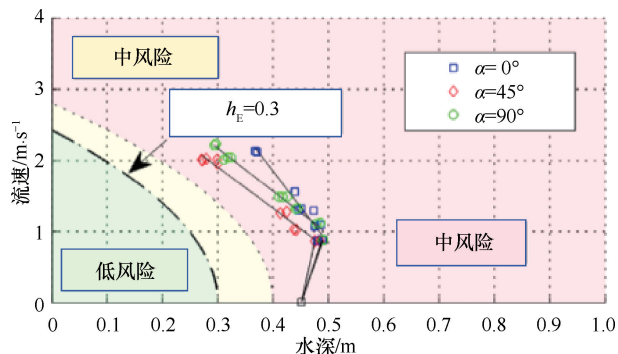


图7 乘用车适航性的推荐安全标准 $h_E = 0.3\text{ m}$ ^[8]

Fig. 7 Recommended safety criteria for the of passenger cars; $h_E = 0.3\text{ m}$

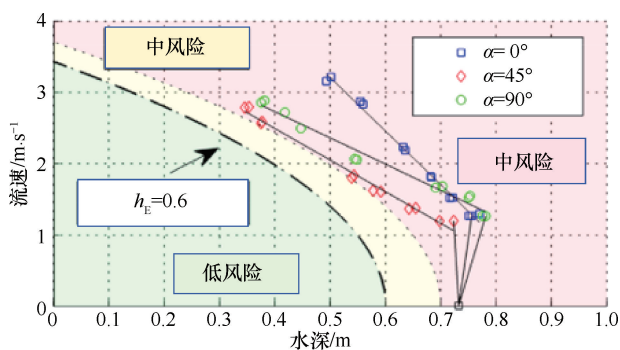


图8 紧急车辆适航性的推荐安全 $h_E = 0.6\text{ m}$ ^[8]

Fig. 8 Recommended safety criteria for roadworthiness of emergency vehicles; $h_E = 0.6\text{ m}$

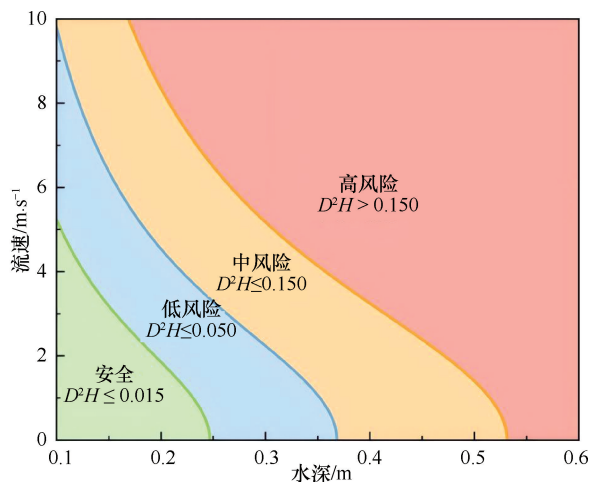


图9 道路行泄通道洪涝风险等级^[65]

Fig. 9 Roadway travelway flood risk classification^[65]

2.3 以车辆特征和水动力学为依据

根据不同的研究方法, 洪涝积水中车辆失稳判别公式可分为理论推导和数据拟合两种, 主要以车辆特征和水动力学为依据推导和拟合出一些经验公式。

KELLER 和 MITCH^[22] 基于力学平衡理论推导出车辆失稳阈值的速度计算公式。XIA 等^[30] 基于力学分析建立了完全淹没车辆初始速度计算公式, 并在推导公式中引入了升力参数, 最后通过试验推导公式中的关键参数和验证公式的准确性。SHU 等^[21] 推导了部分淹没车辆临界运动条件的半经验公式, 随后, XIA 等^[23] 修改了 SHU 等^[21] 提出的初始启动速度公式, 考虑在平行和垂直于水流方向时阻力影响面积的不同, 同时忽略了阻力系数, 提出新的阈值速度计算公式。MARTÍNEZ-GOMARIZ 等^[28] 通过考虑车辆离地间隙、空载重量和规划面积对汽车进行稳定性等级分类, 并导出了稳定性系数 SC_{mod} 的计算公式, 同时根据数据拟合得到车辆的稳定性函数, 为了充分定义稳定性阈值, 还提出了理论浮力深度的计算公式。SHAH 等^[25] 引入滚动阻力和驱动力两个参数, 提出了垂直于流动方向行驶车辆的不稳定准则, 给出洪涝积水中行驶车辆初始速度的新公式, 并使用试验数据验证了该公式的预测准确性。SHAH 等^[12] 和高帅领等^[66] 分别基于滑动平衡力学理论和河流动力学中的泥沙起动原理, 推导出行驶车辆失稳时的临界车速公式。ARRIGHI 等^[6,51] 引入了以车辆长度、宽度、高度、离地间隙、来流方向以及水深为变量的无量纲参数 θ_v , 得到了车辆失稳阈值临界曲线 $\theta_{v_{cr}}$, 当流体弗劳德数计算在曲线之下, 则认为车辆失稳。经验公式推导中对车辆特征常采用简化的几何形态来表征车辆实体, 如将车辆近似为规则的长方体以便水动力学分析。然而, 现实中的车辆外形轮廓呈现出高度的复杂性与不规则性, 车身质量分布、离地间隙等均会干扰水流的绕流形态并改变水流对车辆的作用力分布。在实际应用中, 对经验公式的结果只能作为参考, 还需结合数值模拟和足尺试验研究来提高其可靠性。

表 5 总结了现有的洪涝条件下车辆失稳的公式, 并给出相关参数的含义。这些公式大多基于水动力学平衡理论提出, 一小部分是通过试验数据拟合得到的。但是有些公式在应用中也存在许多限制, 如 ARRIGHI 等^[51] 提出的流动性参数 θ_v 是针对大于车辆底盘高度的水深定义的。目前的车辆失稳判别公式主要采用理论推导, 并通过模型车试验数据验证, 但模型车与真实车辆之间仍有较大差距。为确保推导公式的实际应用, 仍需对不同流态下影响初始运动条件的阻力、升力以及摩擦系数进行可靠的评估^[67]。总而言之, 现有车辆失稳判别公式经验性偏强, 在城市道路洪涝条件下人车安全预警起到参考作用。

3 当前的技术瓶颈和关键技术问题

(1) 洪涝条件下运动车辆的失稳阈值研究面临挑战。从静止车辆收集的稳定性阈值不足以为道路洪涝积水中的运动车辆提供参考。车辆行驶过程中产生的驱动力会影响车辆附近水流的流动特性, 而且涉及的因素众多, 包括水深、流速、地面状况、驾驶员的经验、操作能力和心理状况等, 如何进行多因素耦合分析, 综合评估运动车辆的失稳风险还有待研究。未来仍需科学量化运动车辆在洪涝条件下的失稳风险阈值, 以制定合理的评估指标和标准。

(2) 建立准确的计算流体力学模型来预测洪涝条件下车辆失稳风险是一个技术难点。现有的计算模拟方法可能无法充分考虑各种变量的影响, 未来将面临的主要挑战是如何准确预测非稳态湍流并确定其分离。雷诺平均纳维-斯托克斯方程 (RANS) 单独可能无法全面应对这一挑战, 大涡模拟 (LES) 因高昂的计算成本限制了其在实际工程问题中的应用。鉴于湍流流动的非线性和复杂性, 该领域仍需要通过工程或研究经验进行批判性判断和严格验证。

(3) 采用算法优化静态和动态场景下车辆行驶的实时应急疏散路径是一技术难点。车辆在洪涝条件下的动态行为及环境的相互作用较为复杂, 涉及水流、泥沙等因素的影响。目前关于城市洪涝时人员疏散已有大量研究, 而缺乏车辆失稳造成交通拥堵或者中断后实时应急疏散的具体研究, 如道路数据的准确获取、实时车速数据的捕捉以及洪涝灾害对城市交通的动态影响等, 依然存在较大探索空间, 量化城市洪水对道路交通中断影响的不确定性尚未开发。

(4) 城市道路地表水深与车速关系的研究相对较少。由于轮胎-路面-流体动态相互作用机制的复杂性和影响因素众多, 目前还没有公认的理论程序来直接确定车辆在不同地表水深度下的道路上行驶的最大安全行驶速度。对被淹道路的交通能力、出行时间和空间可达性进行定量评估非常困难。建立与道路水深相关的安全行驶速度函数可以为车辆安全保障和城市洪涝灾害中路网的功能评估提供可靠的参考。

4 未来研究展望

(1) 现有研究主要集中在探究漂浮失稳, 对于真实车辆的滑动失稳阈值尚无试验研究。未来可考虑不同影响因素 (道路坡度、来流方向、运动状态等) 下, 研究不同类型车辆 (如警车、消防车、救护车等) 在洪涝条件下的稳定性。除开展真车试验外, 可考虑

表5 以车辆特征和水动力学为依据的车辆失稳公式

Table 5 Vehicle instability formulation based on vehicle characteristics and hydrodynamics

数据来源	洪水中车辆失稳公式	条件或者假设
KELLER et al ^[22]	$U_c = 2 \left(\frac{\mu F_v}{\rho_w C_D A} \right)^{\frac{1}{2}}$	理论推导
XIA et al ^[30]	$U_c = \alpha \left(\frac{h_f}{h_c} \right)^\beta \sqrt{2g \left(\frac{\rho_c - \rho_f}{\rho_f} \right) h_c}$	理论推导
SHU et al ^[21]	$U_c = \alpha \left(\frac{h_f}{h_c} \right)^\beta \sqrt{2gl_c \left(\frac{\rho_c}{\rho_f} \frac{h_c}{h_f} - R_f \right)}$ $R_f = \frac{h_c \gamma_c}{h_k \gamma_f}$	理论推导
TODA et al ^[7]	$\frac{F_D}{\mu(M_c g - F_B - F_L)} = 1$	理论推导
XIA et al ^[23]	$U_c = \alpha \left(\frac{h}{h_c} \right)^\beta \sqrt{2gl_c \left(\frac{\rho_c}{\rho_f} \frac{h_c}{h} - \frac{h_c \gamma_c}{h_k \gamma_f} \right)}$ $U_c = \alpha \left(\frac{h}{h_c} \right)^\beta \sqrt{2gb_c \left(\frac{\rho_c}{\rho_f} \frac{h_c}{h} - \frac{h_c \gamma_c}{h_k \gamma_f} \right)}$	理论推导
KRAMER et al ^[8]	$h_E = h + \frac{v^2}{2g}$	理论推导
高帅领等 ^[66]	$U_c = \alpha \left(\frac{h_c}{h_c} \right)^\beta U_f - \varphi \sqrt{\frac{G_v - F_B}{b_c h}}$	理论推导
MARTÍNEZ-GOMARIZ et al ^[28]	$SC_{mod} = \frac{GC \cdot M_c}{PA} \mu$ $(v \cdot \gamma) = 0.0158 \cdot SC_{mod} + 0.32$ $h_b = \frac{M_c}{\rho_l l_c b_c} + GC$	数据拟合
SHAH et al ^[25]	$U_c = \sqrt{2 \times \frac{F_N(\mu_{RO} + \mu) + F_{DV}}{\rho C_D A_D}}$	理论推导
SMITH et al ^[9]	$U_c < \sqrt{\frac{2f_\mu F_{T_{rac}}}{\rho A C_D}}$	理论推导
SHAH et al ^[12]	$U_c = \sqrt{2 \times \frac{(W - \rho g V) + \{ (W - \rho g V) x \mu + m a \} \cdot \sqrt{(r+b)(r-b)}}{\sqrt{(r+b)(r-b)} \times \rho C_D A_D}}$	理论推导
ARRIGHI et al ^[6]	$\theta_v = \frac{2l_c}{h_c - GC} \cdot \frac{b_c}{b_c \cdot \cos \gamma + l_c \cdot \sin \gamma} \left[\frac{\rho_c (h_c - GC)}{\rho (h_d - GC)} - 1 \right]$ $\theta_{Ver} = 8.2Fr^2 - 14.1Fr + 5.4$	理论推导和数据拟合

注: U_c 为初始速度; μ 为摩擦系数; C_D 为阻力系数; α 和 β 为车辆经验系数; g 为重力加速度; h_c 为车辆高度; l_c 为车辆长度; b_c 为车辆宽度; h 为水深; ρ_c 为车辆密度; ρ_f 为水的密度; γ_c 和 γ_f 为车辆和水的比重; h_k 为车辆漂浮的临界水深; h_E 为总水头; U_f 为断面平均流速; G_v 为车辆重力; F_B 为浮力; SC_{mod} 为修正稳定性系数; GC 为车辆离地间隙; M_c 为整备质量; PA 为规划区面积; h_b 为浮力深度; F_N 为地面的法向反作用力, 相当于车辆净重; F_{DV} 为驱动力; μ_{RO} 为滚动阻力系数; A_D 为垂直投影的淹没面积; f_μ 为无量纲因子; $F_{T_{rac}}$ 为牵引力; W 为干燥条件下车辆的重量; V 为车辆浸入水中的体积; m 为车辆的重量; a 为加速度; r 为轮胎半径; b 为车轴中心到轮胎不再接触地面的距离; θ_v 为车辆的无量纲流动性参数; γ 为度数($0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$); h_d 为未受扰动的水深; Fr 为弗劳德数。

多个物体(车辆、集装箱等)在洪涝积水中相互作用下的稳定性和运动速度, 进行群体效应的研究以及实际情况的验证。结合实时交通路网, 进一步研究发生洪涝时车辆的应急疏散和拥堵状况模拟。

(2) 车辆轮胎与道路的摩擦系数尚未得到充分研究, 在未来的试验中有必要确定真实车辆轮胎与道路之间的摩擦系数, 保证与真实路况相匹配。这些测试应考虑不同的路面材料和轮胎在不同磨损条件下的情

况。阻力系数和升力系数受多种因素影响, 现有研究尚少, 并未得到很好的量化。需对不同流态下影响初始运动条件的阻力和升力系数进行可靠的评估, 同时需要对部分和完全淹没车辆相关力的系数进一步研究。

(3) 对于数值模拟车辆失稳阈值的技术, 可以通过考虑更精细的方法来深化模拟结果。其中网格划分是其中关键的一步, 未来甚至比现在更将由基于网格和无网格方法的混合、融合共存组成, 诸如模型驱动的自适应网格细化的技术将进一步发展, AI 驱动的网格生成可能是未来的另一个研究方向。同样, 对于基于粒子的 SPH 方法, 自动智能分辨率细化将成为一种成熟的方法论。同时, 可进行将汽车表示为六自由度可移动体的数值模拟, 在城市洪涝条件下对车辆进行动态建模。

(4) 未来可将数据驱动模型与应急路线优化相结合, 创建一个动态的应急决策平台, 减少极端降雨事件对生命安全的威胁。模型的预测可以精确识别出对行人和车辆有不同风险的积水路段, 以及应急救援的最佳位置, 从而辅助规划疏散路线和资源调度。通过人工神经网络(ANN)实时更新疏散指引, 确保发生洪涝时人和车辆能够安全、有序地撤离。

(5) 未来可在现代汽车分类基础上, 结合洪涝条件下汽车失稳的主要影响因素, 深入考量其在车身结构、质量分布、轮胎特性、悬挂系统等的显著差异, 考虑不同车辆的空气动力学与水动力学特性, 针对现有车型(小型车、SUV、越野车等), 动力类型(燃油车、混动汽车、新能源汽车等)与之前的差异, 给出现代车辆失稳评估的分类方法, 基于界定的汽车分类方法, 进一步深入探究不同汽车类型的失稳阈值判别指标。

(6) 洪涝条件下车辆失稳是多因素协同作用下的结果, 与水深、流速、风速、驾驶员操作等外部环境要素及汽车结构、质量特性、行驶速度等内在要素均具强关联性。而现有研究多集中于一些共识因素, 考虑尚且不足。后续可针对不同汽车类型, 系统剖析各类汽车在多元外部环境和内在因素下的稳定性, 进而构建适配且科学的阈值判别指标体系。

5 结论

洪涝条件下车辆的稳定性研究是城市洪涝风险评估的重要内容。目前, 国内外已经开展了大量水槽试验、理论分析和数值模拟研究。然而, 随着车辆的种类增加和结构变化, 判别准则也需要随之更新。同

时, 行人、行车及建筑物安全风险阈值是道路行泄通道设计的必要依据, 未来需要基于这些风险阈值, 对道路排水系统进行优化设计, 提出道路设计纵横坡度、漫幅等参数的推荐值, 确保在洪涝条件下行人和行车的安全性。同时, 需要加强城市规划和建设标准、科学认识洪涝致灾机理、建立动态信息共享机制、优化洪涝灾害应急避险路线、提高洪涝预警预报能力、提升洪涝模拟精度、健全洪涝风险评估框架, 为城市交通安全预警、应急管理系统和城市防洪减灾提供支撑。

参考文献(References):

- [1] 刘波, 戎贵文, 陈情情, 等. 基于 SWMM 的 LID 设施分区布局及减排效益[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 930-939.
LIU B, RONG G W, CHEN Q Q, et al. Regional distribution and mitigation benefit of LID facility based on SWMM[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 930-939.
- [2] 《中国水旱灾害防御公报 2020》概要[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(11): 26-32.
Compilation group of China Flood and Drought Disaster Prevention Bulletin[J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(11): 26-32.
- [3] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22.
WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 17-22.
- [4] 魏思佳. 我国将增发 1 万亿元国债支持灾后恢复重建和提升防灾减灾救灾能力[J]. 中国应急管理, 2023(11): 5.
WEI S J. China will issue an additional 1 trillion yuan of treasury bonds to support post-disaster recovery and reconstruction and enhance disaster prevention, mitigation and relief capabilities [J]. China Emergency Management, 2023(11): 5.
- [5] 杨红林. 洪水作用下车辆安全稳定性研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
YANG Honglin. Study on the Safety and Stability of Vehicles in Floodwaters[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [6] ARRIGHI C, CASTELLI F, OUMERACI H. Effects of flow orientation on the onset of motion of flooded vehicles[M]//ERPICUM S, DEWALS B, ARCHAMBEAU P, et al. Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change. London: CRC Press, 2016: 837-841.
- [7] TODA K, ISHIGAKI T, OZAKI T. Experiments study on floating car

- in flooding[C] //DAVID B, ALBERT C, SLOBODAN D, et al. International Conference on Flood Resilience: Experiences in Asia and Europe. England: University of Exeter, 2013: 1-33.
- [8] KRAMER M, TERHEIDEN K, WIEPRECHT S. Safety criteria for the trafficability of inundated roads in urban floodings [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2016, 17: 77-84.
- [9] SMITH G P, MODRA B D, FELDER S. Full-scale testing of stability curves for vehicles in flood waters [J]. Journal of Flood Risk Management, 2019, 12(S2): e12527.
- [10] AL-QADAMI E H H, MUSTAFFA Z, SHAH S M H, et al. Full-scale experimental investigations on the response of a flooded passenger vehicle under subcritical conditions[J]. Natural Hazards, 2022, 110: 325-348.
- [11] SHAH S M H, MUSTAFFA Z, MATÍNEZ-GOMARIZ E, et al. Hazard risks pertaining to partially submerged non-stationary vehicle on low-lying roadways under subcritical flows [J]. Results in Engineering, 2019, 3: 100032.
- [12] SHAH S M H, MUSTAFFA Z, MATÍNEZ-GOMARIZ E, et al. Hydrodynamic effect on non-stationary vehicles at varying Froude numbers under subcritical flows on flat roadways[J]. Journal of Flood Risk Management, 2020, 13(4): e12657.
- [13] AL-QADAMI E H H, MUSTAFFA Z, ABDURRASHEED A S, et al. Static and moving vehicles stability criteria inside floodwaters: A review[J]. Engineering Letters, 2021, 29(3): 1264-1276.
- [14] HYDRO B C. Life Safety Model Formal Description Engineering Report E299 [R]. Columbia: BC Hydro, British, 2005.
- [15] SHAND T D, COX R J, BLACKA M J, et al. Australian Rainfall and Runoff Project 10: Appropriate Safety Criteria for Vehicles[R]. Australia: Water Research Laboratory, The University of New South Wales, 2011.
- [16] BONHAM A, HATTERSLEY R. Low Level Causeways. August [R]. Sydney: University of New South Wales-Water Research Laboratory, 1967.
- [17] GORDON A D, STONE P B. Car Stability on Road Causeways [R]. Sydney: University of New South Wales-Water Research Laboratory, 1973.
- [18] SHAH S M H, MUSTAFFA Z, YUSOF K W. Experimental studies on the threshold of vehicle instability in floodwaters [J]. Journal Teknologi, 2018, 80(5): 25-36.
- [19] SHAH S M H, MUSTAFFA Z, YUSOF K W, et al. Influence of forces on vehicle's instability in floodwaters [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2018, 9(4): 3245-3258.
- [20] TEO F Y. Study of the Hydrodynamic Processes of Rivers and Floodplains with Obstructions [M]. United Kingdom: Cardiff University, 2010.
- [21] SHU C, XIA J, FALCONER R A, et al. Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters[J]. Journal of Hydraulic Research, 2011, 49(6): 709-717.
- [22] KELLER R J, MITSCH B. Safety Aspects of the Design of Roadways as Floodways [M]. Victoria: Urban Water Research Association of Australia, 1993.
- [23] XIA J, FALCONER R A, XIAO X, et al. Criterion of vehicle stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies [J]. Natural Hazards, 2014, 70(2): 1619-1630.
- [24] OSHIKAWA H, OSHIMA T, HASHIMOTO A, et al. Study on the risk for automobile traffic in a flood situation depending on flow direction [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 2018, 74(4): 1519-1524.
- [25] SHAH S M H, MUSTAFFA Z, YUSOF K W. Instability criteria for vehicles in motion exposed to flood risks[C]//RAZA U M, BIN O M, LATHEEF L D, et al. MATEC Web of Conferences. Paris: EDP Sciences, 2018, 203: 07003.
- [26] 肖宣炜, 夏军强, 舒彩文, 等. 洪水中汽车稳定性的理论分析及试验研究[J]. 泥沙研究, 2013(1): 53-59.
- XIAO X W, XIA J Q, SHU C W, et al. Theoretical analysis and experimental study of stability of flooded vehicles [J]. Journal of Sediment Research, 2013(1): 53-59.
- [27] 肖学, 李传奇, 马梦蝶, 等. 洪水作用下车辆稳定性试验与安全标准[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(33): 200-206.
- XIAO Xue, LI Chuanqi, MA Mengdie, et al. Experiment and safety criteria analysis of vehicles stability under flood [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(33): 200-206.
- [28] MARTINEZ-GOMARIZ E, GOMEZ M, RUSSO B, et al. A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding[J]. Urban Water Journal, 2017, 14(9): 930-939.
- [29] HU X, LI J, WANG W, et al. Experimental testing to determine stability thresholds for partially submerged vehicles at different flow orientations[J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: 129525.
- [30] XIA J, TEO F Y, LIN B, et al. Formula of incipient velocity for flooded vehicles[J]. Natural Hazards, 2011, 58: 1-14.
- [31] 果鹏, 夏军强, 李娜, 等. 洪水中汽车滑移速度试验及应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(4): 533-538.
- GUO Peng, XIA Junqiang, LI Na, et al. Experiments on sliding velocity of flooded vehicles and its application [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(4): 533-538.
- [32] 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: 67-81.
- [33] MILANESI L, PILOTTI M. A conceptual model of vehicles stability in flood flows[J]. Journal of Hydraulic Research, 2020, 58(4): 701-708.
- [34] BOCANEGRA R A, FRANCÉS F. Assessing the risk of vehicle

- instability due to flooding[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2021, 14(4): e12738.
- [35] BOCANEGR A R A, FRANCÉS F. Determining the vehicle instability risk in stream crossings[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2021, 14(4): e12737.
- [36] GOU L, LIU Y, ZHANG Y, et al. Estimating the instability criterion of vehicles in urban flooding by an entropic method[J]. *Urban Climate*, 2022, 41: 101069.
- [37] XIA J, FALCONER R A, LIN B, et al. Modelling flash flood risk in urban areas[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Water Management*, 2011, 164(6): 267-282.
- [38] XIA J, FALCONER R A, LIN B, et al. Numerical assessment of flood hazard risk to people and vehicles in flash floods[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(8): 987-998.
- [39] TEO F Y, LIEW Y S, FALCONER R A, et al. Estimation of flood hazard risk relating to vehicles[C]//WANG Zhaoyin, JOSEPH H W, GAO Jizhang, et al. *Proceedings of the 35th IAHR World Congress; Volume: 1*. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 212-220.
- [40] TEO F Y, XIA J, FALCONER R A, et al. Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows[J]. *International Journal of River Basin Management*, 2012, 10(2): 149-160.
- [41] DONG B, XIA J, LI Q, et al. Risk assessment for people and vehicles in an extreme urban flood: Case study of the "7.20" flood event in Zhengzhou, China[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 80: 103205.
- [42] MEI C, LIU J H, SHI H Y, et al. Exploring impact of street layout on urban flood risk of people and vehicles under extreme rainfall based on numerical experiments[J]. *Science China Technological Sciences*, 2023, 66(9): 2561-2574.
- [43] EVANS B, LAM A, WEST C, et al. A combined stability function to quantify flood risks to pedestrians and vehicle occupants[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 908: 168237.
- [44] 朱呈浩, 夏军强, 陈倩, 等. 基于 SWMM 模型的城市洪涝过程模拟及风险评估[J]. *灾害学*, 2018, 33(2): 224-230.
- ZHU Chenghao, XIA Junqiang, CHEN Qian, et al. SWMM-based urban flood modelling and risk evaluation[J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(2): 224-230.
- [45] 梅超. 城市水文水动力耦合模型及其应用研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- MEI Chao. *Development of a Coupled Urban Hydrological-hydrodynamic Model and Its Application*[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.
- [46] WANG N, HOU J, DU Y, et al. A dynamic, convenient and accurate method for assessing the flood risk of people and vehicle[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 797: 149036.
- [47] DONG B, XIA J, ZHOU M, et al. Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 827: 154098.
- [48] 任春娇. 暴雨雨型对城市洪水中人车失稳风险变化影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- REN Chunjiao. *Study on the Influence of Rainstorm Pattern on the Instability Risk of People and Vehicles in Urban Floods*[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [49] 夏军强, 陈倩, 李娜, 等. 现有洪水中人体失稳标准的评价及改进[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 262-268.
- XIA Junqiang, CHEN Qian, LI Na, et al. Evaluation and further improvement of existing criteria for human stability in floodwaters[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2016, 44(2): 262-268.
- [50] ARRIGHI C, ALCÈRRECA-HUERTA J C, OUMERACI H, et al. Dynamics of vehicle debris during a flood: incipient motion conditions and numerical experiments[C]//ARTHUR M. *Proceedings of the 36th IAHR World Congress*. Hague: International Assn for Hydro-Environment Engineering and Research, 2015: 298-303.
- [51] ARRIGHI C, ALCÈRRECA-HUERTA J C, OUMERACI H, et al. Drag and lift contribution to the incipient motion of partly submerged flooded vehicles[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, 57: 170-184.
- [52] AMICARELLI A, ALBANO R, MIRAUDA D, et al. A Smoothed Particle Hydrodynamics model for 3D solid body transport in free surface flows[J]. *Computers & Fluids*, 2015, 116: 205-228.
- [53] ALBANO R, SOLE A, MIRAUDA D, et al. Modelling large floating bodies in urban area flash-floods via a Smoothed Particle Hydrodynamics model[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 344-358.
- [54] GÓMEZ M, MARTÍNEZ E, RUSSO B. Experimental and numerical study of stability of vehicles exposed to flooding[C]//PHILIPPE G, JEAN C, GUY C. *Advances in Hydroinformatics: SimHydro 2017-Choosing The Right Model in Applied Hydraulics*. Singapore: Springer, 2018: 595-605.
- [55] AL-QADAMI E H H, MUSTAFFA Z, ABDURRASHEED A S, et al. Numerical assessment on floating stability limits for static vehicle under partial submergence[J]. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2020, 15(2): 1384-1398.
- [56] AL-QADAMI E H H, MUSTAFFA Z, AL-ATROUSH M E, et al. A numerical approach to understand the responses of passenger vehicles moving through floodwaters[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2022, 15(4): e12828.
- [57] AL-QADAMI E H H, RAZI M A M, DAMANIK W S, et al. Understanding the Stability of Passenger Vehicles Exposed to Water Flows through 3D CFD Modelling[J]. *Sustainability*, 2023, 15(17): 13262.

- [58] AZHAR F, PAUWELS V R N, BUI H H. Confirmation of vehicle stability criteria through a combination of smoothed particle hydrodynamics and laboratory measurements [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2023, 16(2): e12885.
- [59] AL-QADAMI E H H, RAZI M A M, DAMANIK W S, et al. 3-Dimensional Numerical Study on the Critical Orientation of the Flooded Passenger Vehicles [J]. *Engineering Letters*, 2023, 31(3): 961-968.
- [60] 刘非, 任春娇, 陈垚, 等. 山地城市暴雨洪水中人车失稳风险数值模拟研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(2): 1-19. LIU Fei, REN Chunjiao, CHEN Yao, et al. Numerical simulation study on the flood instability risk of people and vehicles in mountainous cities [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(2): 1-19.
- [61] SMITH G, MODRA B, TUCKER T A, et al. Vehicle Stability Testing for Flood Flows [R]. Sydney: UNSW Water Research Laboratory, 2017.
- [62] SMITH G P, DAVEY E K, COX R J. Flood Hazard [R]. Australia: Water Research Laboratory, School of Civil and Environmental Engineering, UNSW, 2014.
- [63] AEMI. Managing the Floodplain: A Guide to Best Practice in Flood Risk Management in Australia [M]. Australia: Australian Institute for Disaster Resilience, 2010.
- [64] CIRIA. Designing for Exceedance in Urban Drainage—Good Practice; C635 [S]. London, UK: CIRIA, 2014.
- [65] 胡孝哲. 道路洪涝条件下汽车稳定性试验及行泄通道安全性研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2023. HU Xiaozhe. Research on Vehicle Stability Experiments and Safety of Surface Pathway during Road Flooding [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering And Architecture, 2023.
- [66] 高帅领, 夏军强, 周美蓉, 等. 洪水顺流作用下行驶车辆稳定性的模型试验研究 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2020, 53(2): 95-100. GAO Shuailing, XIA Junqiang, ZHOU Mei Rong, et al. A model test study of the stability of vehicles running along the flood current [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2020, 53(2): 95-100.
- [67] SHAH S M H, MUSTAFFA Z, MARTINEZ-GOMARIZ E, et al. Criterion of vehicle instability in floodwaters: past, present and future [J]. *International Journal of River Basin Management*, 2021, 19(1): 1-23.

(责任编辑 王海锋)