

裘清扬,刘祖文,李欣怡,等.城市洪涝灾害风险管理路径规划研究进展[J].人民珠江,2026,47(2):23-36.

城市洪涝灾害风险管理路径规划研究进展

裘清扬¹,刘祖文^{1,2*},李欣怡²,唐明²,郭志国¹

(1.江西理工大学应急管理与安全工程学院,江西 赣州 341000;2.江西水利电力大学水利工程学院,江西 南昌 330099)

摘要:路径规划作为避险转移与资源调度的重要组成部分,为优化洪涝灾害风险管理提供了新思路。首先系统梳理了洪涝灾害风险分析的主要方法,随后从洪涝模拟与应急调度、数字孪生驱动两方面对洪涝灾害风险管理的整体框架进行深入探讨,重点强调路径规划技术在应急调度中的关键作用。在此基础上,按照算法原理将现有路径规划方法分成基于图搜索类算法、基于智能优化的启发式算法和基于模型学习或规则演化的自适应算法,分别分析各类算法的优势、局限性和在洪涝情景中的应用。最后从动态实时性、多目标优化机制、城市水文模型耦合3个维度,系统性总结当前研究存在的问题与挑战,并对未来研究趋势进行展望。

关键词:路径规划;城市洪涝灾害;风险分析;风险管理;算法模型

中图分类号:TV87 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2026)02-0023-14

近年来,洪涝灾害已成为城市水文学的研究热点^[1-2]。洪涝灾害具有突发性强、覆盖面广、破坏性大的特点,是中国乃至全球面临的最常见和最严重的自然灾害之一^[3]。受城市化进程加快、极端气候事件频发以及土地利用变化等因素的影响,洪涝灾害的发生频率和强度呈明显上升趋势。这不仅对人民生命财产安全构成严重威胁,也对城市运行系统和基础设施带来了极大挑战。因此,构建具有韧性的应急响应体系,提升洪涝灾害的风险防控能力已成为国家应急管理体系建设的重要方向^[4-5]。

在洪涝灾害风险管理框架中,应急避险和人员疏散是关键环节。风险管理强调“灾前准备、灾中响应、灾后恢复”的全过程控制,而路径规划正是事前与事中应对的核心手段之一。通过科学合理地规划人员和车辆的避险路径,不仅可以在灾害发生时迅速引导人群向安全区域转移,缓解应急资源压力,还可以降低突发事件造成的次生灾害风险,从而最大程度减少人员伤亡和经济损失。

路径规划技术在无人机^[6]、移动机器人^[7]、GPS

导航^[8]、物流运输^[9]等诸多领域取得了显著进展,其在洪涝灾害应急管理中的应用也日益受到关注。当前已有研究引入Dijkstra算法、A*算法等多种路径规划方法,用于模拟和优化洪涝情境下的疏散方案。但多数研究仍侧重于技术算法层面的分析,对其在动态、复杂、非结构化洪涝环境中的适应性、实时性与多目标协调性等方面探讨尚不充分。此外,洪涝灾害中信息不确定性高、交通系统易受损、疏散人群行为具有不确定性等因素,也对避险路径规划提出了更高要求。

因此,本文在梳理洪涝灾害风险管理体的基础上,系统回顾了路径规划在洪涝灾害应急中的研究现状,重点介绍并对比了3类主流路径规划算法的原理与特点,探讨其适用性、局限性和在洪涝情境下的应用。最后,指出当前研究仍存在路径优化实时性差、动态信息融合不足、多源数据协同处理难等问题,提出未来可从智能化动态避险决策、多场景融合建模等方向进一步深化研究,为洪涝灾害的应急响应与风险控制提供有效支撑。

基金项目:国家自然科学基金项目(52469002)

收稿日期:2025-06-11 **修回日期:**2025-08-15 **网络首发日期:**2025-09-26

作者简介:裘清扬(2000—),男,硕士,主要从事洪涝灾害应急管理研究。E-mail:15079032193@163.com

通信作者:刘祖文(1969—),男,博士,教授,主要从事水水资源调配与高效利用研究。E-mail:liuzw@jxust.edu.cn

1 洪涝灾害风险分析与管理研究现状

洪涝应急管理蕴含着巨大的复杂性^[10],为达到防涝减灾的目的,研究洪涝和衍生灾害下的应急管理显得尤为重要。目前许多学者将风险管理作为应对洪涝灾害的重要手段^[11],其核心原因在于通过对洪涝灾害进行量化评估,可为洪涝灾害的治理提供科学依据。城市洪涝灾害风险管理通过统筹协调多方主体,在灾害全周期中实施系统性干预,以降低灾害发生概率、减轻灾害损失后果、保障公众生命财产安全及恢复城市基本功能为核心目标^[12]。本文将详细阐述洪涝灾害风险分析与管理的各个方面,并分析其具体应用。

1.1 洪涝灾害风险分析

目前,洪涝灾害的风险分析方法主要包括定性与定量或半定量等。定性分析通常基于历史数据应对较为简单的情况,而定量分析则利用数学模型、统计方法和计算机模拟技术来预测洪水发生的概率和可能造成的损失^[13]。国内外学者针对洪涝灾害风险分析已形成多种方法,如基于历史灾情数据统计分析、基于情景模拟分析、基于遥感图像技术和GIS耦合分析和基于指标体系分析等。

a)基于历史灾情数据统计分析。根据已有的历史灾害强度资料为基础,采用数理建模对抽样数据的统计分析,最终结合危险性评估和脆弱性评估形成洪涝灾害综合评估结果。Benito等^[14]利用历史和地质、水利相结合的长时间序列资料进行极端洪灾风险评价,整合多学科方法讨论了洪水风险评估中的水力和统计问题。该方法具有数据需求明确、计算效率高等优势,但在空间分辨率和时间尺度方面存在显著局限性,难以表征风险要素的时空分布特征。

b)基于情景模拟分析。通过建立承灾体损失风险与洪涝灾害危险性和脆弱性之间的关系,利用城市洪涝模型进行多情景的淹没情况模拟,对淹没范围、淹没深度进行分析评估^[15]。Sun等^[16]采用投入产出模型核算不同年份洪涝灾害造成的间接经济损失,并从气象地理条件、暴露度、脆弱性、应急

响应和恢复能力、灾害损失等5个方面构建了全面的洪涝风险评估体系。情景模拟法能真实地反映洪水的时空变化特征,但同时也存在着对基础数据精度要求较高的问题。

c)基于遥感图像技术和GIS(Geographic Information System)耦合分析。将洪涝期间卫星遥感数据与GIS空间分析技术结合,基于实地研究数据建立社会经济数据库,实现洪灾风险评估。该方法优点是可以直观地反映洪水的时空变化规律,但对影像分辨率要求过高,导致精度难以满足现实需要。黄国如等^[17]提出了基于GIS和SWMM(Storm Water Management Model)的暴雨积水计算方法,通过对实测与设计降雨情景下积水数值模拟的比较研究,发现降雨类型对模型模拟效果有较大影响。

d)基于指标体系分析。以灾害风险理论为基础,再结合危险性、脆弱性等因素,建立灾害风险评价的指标体系。指标体系法基于以下理论基础构成^[18]:第一,洪涝致灾因子、孕灾环境和承灾体构成了洪涝灾害的综合函数;第二,洪涝致灾因子的危险性、承灾体的暴露性和脆弱性共同构成了洪涝灾害风险。由于模型计算简单,数据易获取,该方法可从宏观上反映区域风险特征,但也有其局限性:评价指标的选择受到数据可得性的限制以及对数据准确性的要求。

1.2 洪涝风险管理研究现状

随着极端气候事件日益加剧,完善和健全洪涝灾害风险管理与应急管理体制已成为防灾减灾的关键环节^[19-20],因此系统梳理洪涝风险管理机制具有必要性。近年来,随着物联网、大数据、人工智能与数字孪生等技术的快速发展,洪涝风险管理的体系正在向数字化、智能化和集成化方向转型。在该过程中,路径规划不仅是资源调度与人员疏散的重要支撑手段,更在风险预判、动态响应和应急处置中发挥着关键作用,已成为洪涝风险管理中的关键要素。本文聚焦于路径规划在洪涝风险管理中的综合应用,涵盖洪涝模拟、应急响应调度以及数字孪生驱动下的治理技术,可为实际应用提供理论支撑和方法参考。

1.2.1 洪涝模拟与应急响应调度研究

城市洪涝模拟是风险管理中的关键环节,目前常见的城市雨洪模型有SWMM^[21]、MIKE^[22]、Info Works等^[23],其主要功能是再现降雨过程中雨水在城市地表-地下系统中的汇流、积涝与传播过程,为应急调度与资源配置提供理论支撑。城市下垫面的特殊性使得产汇流机理更加复杂,对模型要求也更高^[24]。在这些模型中,物理参数的精确测定尤为关键,而多源数据平台提供的实时数据正好满足了这一需求。近年来,随着传感器网络、遥感技术和大数据平台的快速发展,洪涝灾害数据的获取途径日益多样化,包括气象雷达降雨数据、雨量站实测数据、高分辨率DEM以及城市物联网监测数据等。通过对多源数据的输入,洪涝模拟模型可以预测出洪水的到达时间、淹没深度等结果。而路径规划技术可基于该结果,在优化运输路线、规划疏散通道等方面发挥重要作用,为洪涝应急调度的动态调整提供数据支撑。

在应急调度层面,研究聚焦于多目标路径优化与资源配置问题。洪涝应急响应调度系统中各模块关系见图1,在这个系统中,路径规划既是一种决策支持工具,也是执行调度的关键环节。

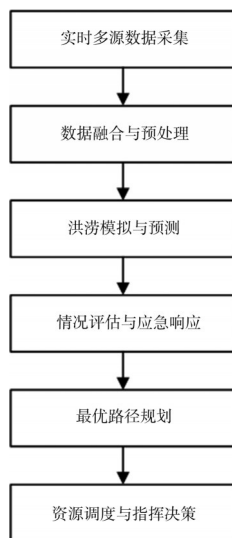


图1 洪涝应急响应调度流程

Fig. 1 Process of flood emergency response scheduling

研究者引入图搜索算法、启发式算法等路径规划算法,实现动态避险路径规划与物资调配优化。

尤其在城市交通系统高度复杂、涝情发展迅速的背景下,结合洪涝模拟结果与城市路网图,实现路径规划与灾情动态交互成为研究热点。刘卫林等^[25]基于罗塘河溃堤洪水风险模拟结果,对洪涝风险影响因素进行分析,建立研究区道路网解析模型,从而得出洪涝灾害风险区的避险转移路径。王泽健^[26]建立了以时效性、安全性为前提的多目标应急车辆路线优化模型,针对多个受灾点构建以车辆行驶时间最短为前提,利用带精英策略的非支配排序遗传算法对其进行求解,并以怀化市2011特大洪涝灾害为例检验该方法的科学性。胡晓伟等^[27]以通行时间最短为目标,考虑路面积水对车辆通行速度的动态影响,构建应急车辆救援路径优化模型。根据SWMM模拟得到的50年一遇暴雨条件下城市道路路面的积水情况,设定应急救援场景,求解应急救援路径。

1.2.2 数字孪生驱动下的洪涝治理技术

数字孪生技术是通过构建物理城市的虚拟映射,实现对城市系统状态的实时感知、预测与反馈控制^[28]。将该理念引入洪涝灾害治理领域,有助于打破传统静态模拟方式的限制,实现洪涝场景的动态模拟与响应策略的即时调整,提升城市洪涝管理效率^[29]。Kaynak等^[30]提出了一种大尺度城市洪涝数字孪生框架,通过集成洪水预警、交通网络和基础设施系统,实现洪涝场景模拟与级联影响评估,以爱荷华州为例,展示了其在灾前评估和应急演练中的应用价值。

在洪涝情境中,路径规划可结合数字孪生系统,利用实时数据与历史经验构建不同疏散方案模型,在突发事件发生前通过仿真模拟预测出潜在风险区域,从而提前规划出安全、快捷的疏散路线。此外,数字孪生环境还能够帮助应急调度人员设计救援物资运输的最优网络。这种应用模式不仅提升了应急响应效率,同时也降低了因路径选择不当导致的救援延误风险。叶陈雷等^[31]以福州市主城区的城市洪涝数字孪生系统基本构架为例,阐述了数字孪生技术可搭建不同尺度的城区治理应对体系。在此系统中,利用数字孪生技术构建出虚拟城

市场场景及洪水演变过程模型,结合路径规划技术,系统能够根据实时数据预测城市内易涝点与疏散通道受阻情况,动态规划出最优逃生路径与物资运输路线,当部分道路因积水受阻时,系统会自动建议备用路线,优化救援资源的调度。但同时也存在需多学科交叉融合,在过去、现在、未来不同时间段处理不同层级任务的挑战。

1.3 当前研究不足之处

目前,城市内涝应急管理方式逐渐从“灾前准备、灾中响应、灾后恢复”往系统化、整体化过渡。然而从管理方法上看,应急管理手段在跨学科融合方面仍显薄弱,缺乏支持水文与水动力学、社会学、环境学等多学科集成的系统性理论框架和技术平台,难以实现复杂灾害情境下的智能分析与联动决策^[32]。从管理内容上看,部分研究未能充分考虑城市雨洪时空演化的差异性,导致模拟结果在识别高风险区域与资源短缺区域方面存在盲区,进而影响应急资源的精准调度与救援效率^[33]。并且现行风险评估体系与应急预案多基于静态场景假设,缺乏对突发性洪涝时空演化的动态模拟,一旦实际灾情超出预设情境范围,既有响应策略难以及时调整,不利于实现“预警-决策-响应”一体化管理的目标^[34]。

随着计算机技术不断发展,情景模拟在城市洪涝应急管理中辅助决策占比越来越高。针对上述挑战,可通过网络建模将道路与桥梁节点视为图论中的顶点,道路通行能力、水深阈值和实时车流量作为边的多维权重,形成可动态更新的网络图。再集成实时降雨、淹没深度、交通流量信息等数据,通过物联网与GIS平台实现边权参数的时序更新,实现多源数据融合。应用Dijkstra或A*算法快速计算最优疏散路径,针对多目标优化情景如最短时间、资源消耗最少等可采用遗传算法生成一组最优路径方案。针对多车辆、多人员疏散问题,建立基于深度强化学习的调度模型,让智能体在仿真环境中自主学习,实时调整路径分配策略,提高疏散效率和指挥灵活性。通过结合路径规划研究与智能算法共同构建城市洪涝动态应急管理框架。

2 路径规划对城市洪涝灾害风险管理的影响与作用

与关注最短路径或最低成本的普遍路径规划研究不同,洪涝救援的最佳路径考虑了及时性和安全性的综合影响^[35]。及时性至关重要,因为救援工作的延误可能加剧生命和财产损失,而安全的重要性体现在:洪水对建筑物和道路造成结构性破坏,以及快速流动的水会携带危险物质或碎片,对经过的救援人员构成威胁^[36]。城市洪水影响相关的不确定性和复杂性对救援路径规划提出了重大挑战。基于此,风险管理对于规划最佳救援路径具有重要意义^[37-38]。

通过文献计量法梳理路径规划在洪涝风险管理中的应用。数据库来源中国知网,时间节点选取2010—2025年,以“城市内涝”“内涝”“路径规划”为主题,共检索得到文献1607篇,利用Citespace得到“城市内涝+路径规划”的关键词共现网络(图2)。由图可知情景模拟、内涝治理、韧性城市等关键词高频出现,颜色偏红,说明研究向风险韧性、系统模拟与多灾种管理融合方向发展。由于路径规划在洪涝研究中是交叉方法工具,而非主研究对象,例如路径规划在情景模拟中用于模拟洪涝过程中的避险路径分析,在内涝治理中提供决策参考指标,在韧性城市中体现城市交通网络布局。所以在图中虽然不是最大节点,却通过多个高频关键词表现其方法特征。

本文按算法原理分为基于图搜索类算法、基于智能优化的启发式算法和基于模型学习或规则演化的自适应算法进行梳理。

2.1 基于图搜索类算法

2.1.1 Dijkstra算法

Dijkstra算法由荷兰计算机科学家Dijkstra于1959年提出^[39],该算法核心优化目标是找到从单一源节点到图中所有其他节点的最短路径,是一种按照权重由高到低的顺序生成最短路的算法。Dijkstra算法流程见图3^[40],其基本思路是:以给定的节点为中心,利用贪婪算法,对当前所关注的节

点最近的邻居节点进行遍历,并排除已遍历的节点,直至遍历到终点为止。Dijkstra算法具有很好的鲁棒性和健壮性^[41],在复杂多变的环境中依然适用。然而该算法的时间复杂度为 $O(n^2)$,其中 n 表示

图中节点的数量,因此在执行过程中需要搜索许多不必要的拐点,用于大规模地图计算时成本极高^[42],这浪费了计算机资源,效率偏低。

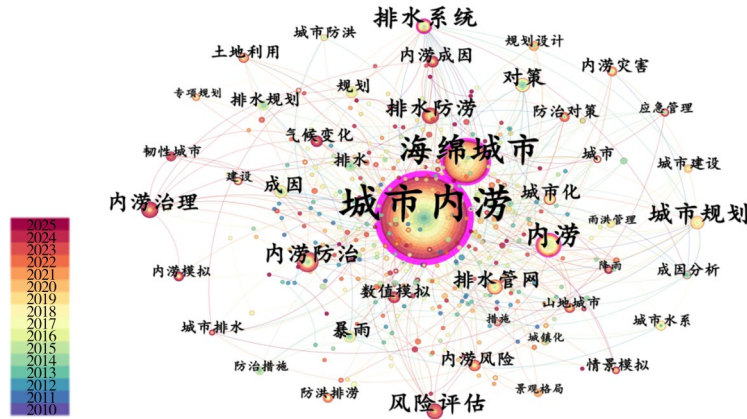


图 2 关于“城市内涝+路径规划”的关键词共现网络(2010—2025年)

Fig. 2 Co-occurrence network of keywords related to “urban flooding + path planning” (2010—2025)

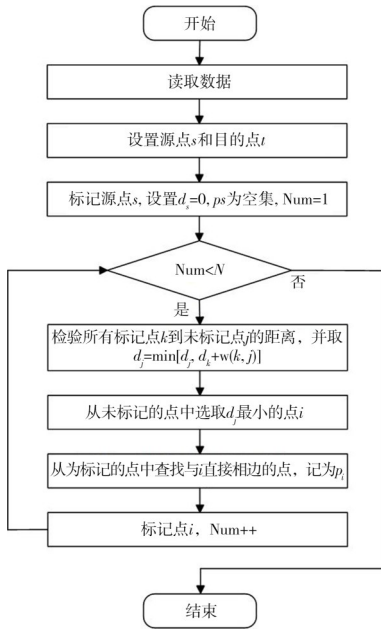


图 3 Dijkstra 算法流程

Fig. 3 Process of Dijkstra algorithm

部分研究者们将 Dijkstra 算法与其他算法结合来改善使用效率,Zhou 等^[43]引入了实时节点占用情况和时间窗冲突判断模型,可以确定每个任务的最短可行路线,避免多个任务执行时的路径冲突问题,规划出无冲突的最短路径。Guo 等^[44]将二维流

体动力学模型和 Dijkstra 算法相结合,通过考虑洪涝灾害危险程度来规划行人的避险路径,模拟出多条逃生路线的同时还得出行人疏散时间。Li 等^[45]基于高分辨率二维水动力模型、路段权重值模块和 Dijkstra 算法提出了一种确定洪涝灾害风险规避路径的系统框架,以沔西新城为例,创建了 4 种不同的降雨条件情景来验证框架的适用性,每个场景的平均算法耗时完全可以满足该区域应急救援中的计算效率要求。

2.1.2 A*算法

A* 搜索算法的核心思想是启发代价评估函数^[46]: $f(x) = g(x) + h(x)$,其中, $g(x)$ 代表节点 n 至起点的代价,是当前的实际代价; $h(x)$ 代表节点 n 至目标点的代价,是估计代价,代价通常用欧几里得距离、曼哈顿距离和切比雪夫距离表示。A*算法核心优化目标是在保证找到最短路径的前提下将启发式信息引入到目标点,从而减少搜索过程中需要探索的节点数量,提高搜索效率^[47]。然而,当目标函数选取不当时,则有可能产生与最优解不符的路径。

为了降低搜索耗时,Xu 等^[48]提出了一种新的基

于 A* 的优化方法,用无遮挡物的矩形边界替换了原来的八位字节邻域,实现起始节点和目标节点的双向探测,从而大大降低了搜索过程中所需的结点数,提高了搜索效率。而在洪涝情景中,申腾飞^[49]基于水深与车辆速度的关系,建立了随时间变化的道路网络权值矩阵。在此基础上,针对内涝灾害的动态演化过程,采用 A* 算法建立考虑内涝灾害影响的动态救援路径规划算法。Mohammad 等^[50]将 A* 算法运用在洪涝救生船救援路径规划中,并与 Dijkstra 算法对比,结果表明在单一起始点情况下 A* 算法效率最高,但对于更实际的情况, A* 算法计算时间最短但不能保证最短路径。Bahareh 等^[51]使用深度神经网络和图像处理分析洪涝前后停车标志照片,估计照片所在位置的洪水深度。将生成的点深度数据转换为洪水淹没图并结合 A* 算法确定最优路径,研究结果为救援队和撤离人员提供了重要信息。

2.2 基于智能优化的启发式算法

2.2.1 遗传算法

遗传算法 (Genetic Algorithms, GA) 是由 John Holland 在 20 世纪 70 年代提出的一种优化搜索算法,该算法通过模拟自然界的进化和遗传过程,利用选择、交叉和变异等操作,生成下一代的潜在解或优化解,从而逐步接近最优结果^[52]。其核心优化目标是通过适应度函数最大化选择最优路径个体。遗传算法流程见图 4,与已有的优化方法相比,它的优点是不需要解的梯度信息,并行性好,全局寻优能力强。然而,由于遗传算法中涉及到种群规模以及变异概率等重要参数的选取,因此如何选取合适的参数,将会极大地影响到算法的性能^[53]。而合适的参数通常需要通过经验积累或大量实验来确定,这在一定程度上增加了计算资源和时间消耗。

研究者们发现将 GA 与蚁群算法相结合,有效降低了算法陷入局部最优的风险,并显著缩短了执行时间,同时在实时约束条件下仍能提高找到最佳路径的概率^[54]。路耀卓^[55]将 Dijkstra 算法与 GA 结合,得到了一个优化的 D-GA 算法,并将其应用于模拟水利调度方案中。Mohammad 等^[56]利用无人机在洪涝环境中提供的航空成像,根据生成的地图使

用 GA 算法求出洪涝救援船的最优路径,并与 A*、概率路线图算法结果对比,结果表明在参数选取合适的情况下,GA 算法耗时更短。综上所述,尽管传统遗传算法存在参数选择依赖性和计算成本高等问题,但通过改进算法设计、结合其他智能算法或引入新型算子等手段,不仅提升了算法的全局搜索能力和收敛速度,还增强了其适应不同环境的能力,为实际工程应用提供了可靠的技术支持。

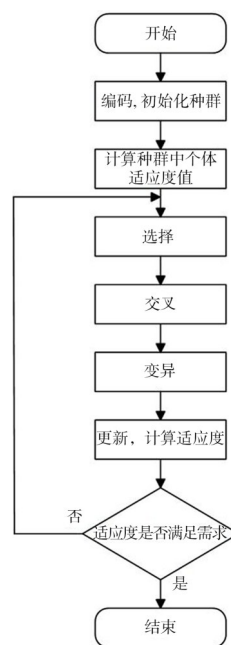


图 4 GA 算法流程

Fig. 4 Process of GA algorithm

2.2.2 蚁群算法

蚁群算法 (Ant Colony Optimization, ACO) 通过设置最短路程作为目标函数,运用蚂蚁寻找食物时的信息素沉淀和信息素蒸发规则,逐步搜索出最优路径^[57]。蚁群算法原理为:首先计算 t 时刻蚂蚁 k 从 i 位置移动到 j 位置的状态概率,计算见式(1)、(2)。

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j \in C} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & j \in C \\ 0, & j \notin C \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \eta_{ij}(t) = 1/d_{ij} \\ d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $p_{ij}^k(t)$ 为状态概率; τ_{ij} 为 t 时刻 i 位置到 j 位置的信息素浓度; $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数; α 为信息素因子; β 为启发函数因子; C 为待访问领域集合; d_{ij} 为位置 i 到位置 j 的欧式距离; (x_i, y_i) 为位置 i 的直角坐标; (x_j, y_j) 为位置 j 的直角坐标。

在蚂蚁觅食的过程中会释放信息素并残留在路径上,有利于后面的蚁群选择该路径,随着时间的推移,路径上的信息素会积累、挥发而不断更新,更新见式(3)、(4):

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \tau_{ij}^k, \rho \in (0,1) \quad (3)$$

$$\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{蚂蚁}k\text{经过该路径} \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (4)$$

式中: τ_{ij}^k 为 t 时刻蚂蚁 k 在该路径上残留的信息素浓度; ρ 为信息素挥发因子; m 为蚁群最大数量; Q 为信息素强度; L_k 为当前迭代过程中蚂蚁 k 规划的路径长度。

ACO的核心优化目标是通过模拟蚂蚁行为找到全局最短路径,该算法已被证明具有分布式计算和健壮性等优点,可以轻松应对各种参数众多且复杂的路径评估模型^[58]。此外,它在逼近复杂的组合优化问题如旅行商问题方面具有良好的性能,因此其应用前景非常广阔。然而ACO存在运行时间长、易卡顿的缺点,限制了其在许多领域的广泛应用^[59]。吴正佳等^[60]基于蚁群算法建立求解三峡水利枢纽汛期洪水调度的模型,仿真结果表明该模型计算效率高,可有效处理洪水优化调度问题。谢小平等^[61]用改进后的蚁群算法求解典型洪水同频率放大问题,构造了用于设计洪水过程求解的结构图,通过实际洪水放大的计算,证实了该方法在洪水同频率放大优化模型中的合理性和有效性。Yang等^[62]将不同类型的人分配不同的权重作为规划问题的优化目标,通过重新定义信息素浓度增量计算的改进ACO算法,规划城市应急救援路径,并在信息素更新过程中加入了奖励机制,避免模型陷入局部最优。

2.3 基于模型学习或规则演化的自适应算法

2.3.1 深度强化学习

近年来深度学习(Deep Learning, DL)已成为人工智能领域的研究热点,在语音识别^[63]、图像分析^[64]、目标检测^[65]等领域取得巨大成功。学习的核心目标是学习数据的高阶特征表示,进行预测或生成。强化学习(Reinforcement Learning, RL)作为该领域另一研究热点,核心目标是学习智能体与环境交互中的最优策略来最大化累积回报。深度强化学习(Deep Reinforce Learning, DRL)是DL与RL的结合,用深层神经网络代替传统表格,提高策略学习能力和泛化性。DRL原理框架见图5^[66],核心优化目标是在不确定环境中,学习一个策略,使得智能体通过与环境的连续交互,实现最优行为决策,从而最大化其长期累积收益。DRL自主学习力强,具有全局决策能力,并且易与其他模型耦合,但也存在收敛不稳定、训练样本需求量大的情况。

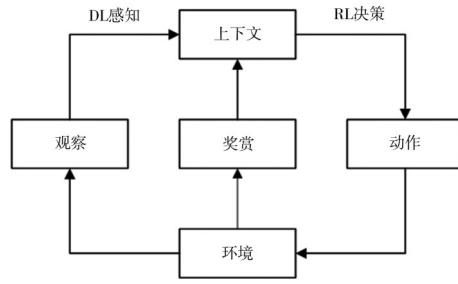


图5 DRL原理框架

Fig. 5 DRL principle framework

在路径规划中,与RL相比,DRL处理复杂高维空间的动态规划能力更为突出,因此可有效提高算法的动态避障能力^[67]。Li等^[68]通过评估不确定的风险因素并结合DRL开创了一种新型的路径规划算法,以在具有不确定性的洪涝疏散路径场景中发挥作用。但他们并没有关注洪涝中出现的复杂障碍,这限制了方法的有效性。在后续研究中该团队不断完善,开发了一种能在风险不确定性和各种复杂障碍下进行城市洪涝救援路径规划的算法^[69],将基于DRL的网格路径规划研究扩展到随机奖励和复杂障碍共存的场景。研究结果表明所提出的算

法在收敛到最优路径、运行效率方面优于当前最先进的算法。该研究有助于城市洪涝救援、深度强化学习、风险评估和决策智能的理论进展,为智慧城市应急管理提供技术支撑。

2.3.2 元胞自动机

元胞自动机(Cellular Automata)通常包括元胞、空间格局、邻域、演化规则四要素,其核心优化目标是用一组简单、局部的演化规则,在离散的时间和空间上,模拟复杂系统中全局行为的时空演化过程^[70]。CA的系统在每一个离散时间步按照以下方式演化:对每个元胞,收集它的邻域状态;根据预设的状态转移规则,确定该元胞在下一步的状态;所有元胞同步更新状态;迭代执行,模拟系统时空演变过程。CA具有高并行性,可用于GPU加速计算,并且易结合GIS、遥感影像等数据,还能通过嵌入机器学习算法增强智能性,因此擅长模拟局部作用导致的全局复杂行为,广泛应用于流行病学^[71]、城市规划^[72]、交通仿真^[73]等领域,但也存在空间粒度受限于格点划分,对连续变量模拟能力有限,模型规

则依赖专家经验,难以精确泛化等局限。

在洪涝建模中,CA将研究区域划分为规则网格,每个元胞表示一个地理单元,用于记录积水、淹没等状态,根据降雨、地形坡度、水流方向、水动力学规则构建状态转移模型,通过多步迭代模拟水体扩散、积水演化、洪水峰到达时间等。Yao等^[74]提出了一种基于CA的新型降雨径流模型用于洪涝模拟和分析不同的径流产生过程,包括植被截留、渗透、洼地储存、排水或上述因素的组合,用于确定单位面积的淹没深度。而在路径规划方面,Li等^[75]将CA与二维水动力模型、洪涝灾害评估模型结合,构建了一套兼顾洪涝风险识别和最短疏散路线规划的模拟方法。He等^[76]结合流体动力学、地形和行人响应时间开发了一种基于CA的动态路线优化算法来识别动态洪水疏散路线,与传统A*算法得到的路线长度相比大幅缩短,并且该算法可识别洪涝过程中地形连通性的动态变化,从而提供最优路径。

各类算法的原理、优势与局限见表1。

表1 路径规划算法汇总

Tab. 1 Summary of path planning algorithms

算法类别	算法名称	内容	优点	局限
图搜索算法	Dijkstra算法	按权重由高到低生成最短路	有较强的鲁棒性与健壮性,适用范围广	时间复杂度高,易产生冗余节点
	A*算法	计算当前节点距目标节点的最小估计代价	引入启发式算法,计算简单	可能产生与最优解不符的路径
启发式优化算法	遗传算法	模拟生物进化与遗传学产生优化解	并行性好,全局寻优能力强、范围广	须选取合适参数,时间消耗较大
	蚁群算法	模拟蚂蚁寻找食物的行为搜索最优解	鲁棒性和自适应性强	运行时间长,易发生卡顿
自适应演化算法	深度强化学习	智能体与环境交互,通过奖励机制学习最优策略	可适应复杂动态环境、学习能力强	训练成本高、收敛慢、解释性差
	元胞自动机	模拟局部状态演化形成全局路径行为	可模拟环境变化、规则简单	规则设计复杂、结果不确定

3 结论与展望

本文系统地分析了城市洪涝灾害风险应对的理论框架与方法体系,重点探讨了路径规划算法作为新兴计算工具在洪涝灾害风险评估中的创新应

用。该理论框架不仅优化了洪涝灾害发生时的疏散策略,还显著提升了洪涝灾害应急管理的效率与响应能力。然而,尽管路径规划算法在洪涝灾害应急管理领域展示了较大的应用潜力,其理论体系仍

面临以下关键挑战。①动态灾害环境下的算法实时性不足。多数路径规划算法适用于静态环境,难以应对动态洪涝场景中的时空变化,动态数据同化滞后易导致次优甚至失效路径。②多目标优化与决策权衡机制不完善。现有方法常聚焦最短路径或最低淹没风险,忽视疏散公平性、关键基础设施覆盖等多元社会效益目标,缺乏系统性的多目标优化框架。③与城市水文模型的耦合精度不足。现有耦合多为水文模型到路径规划的单向驱动,未考虑疏散行为对水文条件的反作用。

针对上述挑战,未来研究可从以下方向推进。

①增强动态灾害环境下的实时计算能力。未来研究应致力于开发自适应实时路径规划算法,以应对时变洪涝灾害场景的复杂性与不确定性。②建立多目标协同优化与鲁棒决策机制。需构建多目标鲁棒路径规划框架,以平衡冲突性目标并量化决策不确定性,并引入偏好模型,结合决策者效用函数筛选最终方案。③强化水文—路径双向高精度耦合。采用局部网格细化实现关键区域的高精度耦合,并通过机器学习建立疏散行为对水文系统的代理模型,引入博弈论协调个体与系统行为,提升模型响应的现实性与预测能力。

参考文献:

- [1] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展,2017,28(6):820-828.
HOU J M, GUO K H, WANG Z L, et al. Numerical Simulation of Design Storm Pattern Effects on Urban Flood Inundation [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28 (6) : 820-828. (in Chinese)
- [2] 刘家宏,王浩,高学睿,等. 城市水文学研究综述[J]. 科学通报,2014, 59(36): 3581-3590.
LIU J H, WANG H, GAO X R, et al. Review on Urban Hydrology [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(36): 3581-3590. (in Chinese)
- [3] 徐宗学,程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础:城市水文学研究进展[J]. 水利学报,2019, 50(1): 53-61.
XU Z X, CHENG T. Basic Theory for Urban Water Management and Sponge City—Review on Urban Hydrology [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 53-61. (in Chinese)
- [4] ABEBE Y A, GHORBANI A, NIKOLIC I, et al. Flood risk management in Sint Maarten – A coupled agent-based and flood modelling method [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 248. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109317.
- [5] CHANG H J, YU D J, MARKOLFS A, et al. Understanding Urban Flood Resilience in the Anthropocene: A Social-Ecological-Technological Systems (SETS) Learning Framework [J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2020, 111(3): 837-857.
- [6] KHAN M T R, MUHAMMAD SAAD M, YANG R, et al. Aspects of unmanned aerial vehicles path planning: Overview and applications [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2021, 34(10). DOI: 10.1002/dac.4827.
- [7] LEE J. Heterogeneous-ants-based path planner for global path planning of mobile robot applications [J]. *International Journal of Control*, 2017, 15:1754-1769.
- [8] AKHSHIRSH G S, AL-SALIHI N K, HAMID O H. A cost-effective GPS-aided autonomous guided vehicle for global path planning [J]. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2021, 10(2). DOI: 10.11591/eei.v10i2.2734.
- [9] FUSIC S J, SITHARTHAN R, MASTHAN S A R S, et al. Autonomous vehicle path planning for smart logistics mobile applications based on modified heuristic algorithm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 34(3). DOI: 10.1088/1361-6501/aca708.
- [10] 张德,王霖琳. 基于复杂系统理论的北京城市内涝应急管理研究[J]. 城市,2016(4):49-53.
ZHANG D, WANG L L. Complex Systems Theory-Based Research on Emergency Management of Urban Waterlogging in Beijing [J]. *Journal of Urban Sciences*, 2016(4): 49-53. (in Chinese)
- [11] CLAR C, JUNGER L, NORDBECK R, et al. The impact of demographic developments on flood risk management systems in rural regions in the Alpine Arc [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, 90. DOI: 10.1016/j.ijdr.2023.103648.
- [12] 周军,潘志祺,蔡琪. 广州中心城区新型城市内涝应急管理模式经验探讨[J]. 中国给水排水,2023, 39(16):41-45.
ZHOU J, PAN Z Q, C Q. Discussion on the Experiences of New Emergency Management Model of Urban Waterlogging in Guangzhou Central Urban Area [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(16): 41-45. (in Chinese)
- [13] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护,2020,36(6):1-6,17.

- HUANG G R, LUO H W, LU X X, et al. Study on Risk Analysis and Zoning Method of Urban Flood Disaster [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(6): 1-6, 17. (in Chinese)
- [14] BENITO G, LANG M, BARRIENDOS M, et al. Use of Systematic, Palaeoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation. Review of Scientific Methods [J]. *Natural Hazards*, 2004, 31: 623-643.
- [15] 黄国如,张灵敏,雒翠,等. SWMM模型在深圳市民治河流域的应用[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(4): 10-14.
- HUANG G R, ZHANG L M, LUO C, et al. Application of SWMM Model in Minzhi River Basing of Shenzhen City [J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(4): 10-14. (in Chinese)
- [16] SUN H, ZHA Z Y, HUANG C, et al. Flood disaster industry-linked economic impact and risk assessment: a case study of Yangtze River Economic Zone [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2024, 27: 15703-15726.
- [17] 黄国如,黄维,张灵敏,等. 基于GIS和SWMM模型的城市暴雨积水模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(4): 1-6.
- HUANG G R, HUANG W, ZHANG L M, et al. Simulation of Rainstorm Waterlogging in Urban Areas Based on GIS and SWMM Model [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(4): 1-6. (in Chinese)
- [18] 权瑞松. 典型沿海城市暴雨内涝灾害风险评估研究[D]. 上海:华东师范大学, 2012.
- QUAN R S. Research on Risk Assessment of Rainstorm Waterlogging Disaster in Typical Coastal City [D]. Shanghai: East China Normal University, 2012. (in Chinese)
- [19] 程晓陶,刘昌军,李昌志,等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J]. *水利学报*, 2022, 53(7): 757-768, 778.
- CHENG X T, LIU C J, LI C Z, et al. Theoretical Framework and Application of Urban Rainstorm Flood Control in High-density Cities [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(7): 757-768, 778. (in Chinese)
- [20] 刘洁,尚裕长,张翔,等. 城市雨洪管理措施布局与优化研究综述[J]. *人民珠江*, 2024, 45(10): 1-14.
- LIU J, SHANG Y C, ZHANG X, et al. Layout and Optimization of Urban Stormwater Management Measure: A Review [J]. *Pearl River*, 2024, 45(10): 1-14. (in Chinese)
- [21] PENG Z D, LIN X Y, SIMON M, et al. Unit and regression tests of scientific software: A study on SWMM [J]. *Journal of Computational Science*, 2021, 53. DOI: 10.1016/j.jocs. 2021. 101347.
- [22] 严恒恒,卢巧慧. MIKE FLOOD模型在高密度建成区排涝方案中的应用:以深圳市福海河南片区为例[J]. *人民珠江*, 2024, 45(12): 30-38.
- YAN H H, LU Q H. Application of MIKE FLOOD Model in Drainage Schemes for High-density Built-up Areas: Taking the Southern Region of Fuhai River in Shenzhen as an Example [J]. *Pearl River*, 2024, 45(12): 30-38. (in Chinese)
- [23] SIDEK L M, JAAFAR A S, MAJID W H A W A, et al. High-Resolution Hydrological-Hydraulic Modeling of Urban Floods Using InfoWorks ICM [J]. *Sustainability*, 2021, 13(18). DOI: 10.3390/su131810259.
- [24] 刘家宏,梅超,向晨瑶,等. 城市水文模型原理[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(5): 1-5, 13.
- LIU J H, MEI C, XIANG C Y, et al. Principles of Urban Hydrological Model [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(5): 1-5, 13. (in Chinese)
- [25] 刘卫林,万一帆,刘丽娜,等. 基于罗塘河溃堤洪水风险的避洪转移方案研究[J]. *水利规划与设计*, 2020(6): 35-40.
- LIU W L, WAN Y F, LIU L N, et al. Risk-Driven Flood Evacuation Planning for Dike-Breach Flooding Scenarios in the Luotang River Basin [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2020(6): 35-40. (in Chinese)
- [26] 王泽健. 洪涝灾害应急物流车辆路径优化:以怀化市为例[D]. 长沙:长沙理工大学, 2020.
- WANG Z J. Optimization of Emergency Logistics Vehicle Route in Flood Disaster: A Case Study of Huaihua City [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020. (in Chinese)
- [27] 胡晓伟,卢泓博,安实. 考虑暴雨灾害动态影响的城市应急车辆救援路径优化研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2024, 24(3): 75-82, 93.
- HU X W, LU H B, AN S. Optimization of Urban Emergency Vehicle Rescue Route Considering Dynamic Impact of Rainstorm Disasters [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(3): 75-82, 93. (in Chinese)
- [28] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等. 数字孪生及其应用探索[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1-18.
- TAO F, LIU W R, LIU J H, et al. Digital Twin and Its Potential Application Exploration [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(1): 1-18. (in Chinese)
- [29] 李强. 基于数字孪生技术的城市洪涝灾害评估与预警系统分析[J]. *北京工业大学学报*, 2022, 48(5): 476-485.
- LI Q. Analysis of the Evaluation and Pre-warning System of the Urban Flood Disaster Based on the Digital Twin Technology [J].

- Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(5): 476–485. (in Chinese)
- [30] KAYNAK S, KAYNAK B, MERMER O, et al. City-Scale Digital Twin Framework for Flood Impact Analysis: Integrating Urban Infrastructure and Real-time Data Analytics [M]. California: California Digital Library, 2025. DOI: 10.31223/X53F0T.
- [31] 叶陈雷,徐宗学. 城市洪涝数字孪生系统构建与应用:以福州市为例[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(7):5–11,29.
YE C L, XU Z X. Development and Application of Digital Twin System for Urban Flood and Waterlogging: Case study of Fuzhou City [J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(7): 5–11, 29. (in Chinese)
- [32] 赵凯旭,王建明,闫茜,等. 西安市老城区暴雨内涝模拟及其灾害风险评估[J]. 自然灾害学报,2023,32(4): 1–12.
ZHAO K X, WANG J M, YAN Q, et al. Urban Waterlogging Simulation and Its Risk Assessment in the Old Area of Xi'an [J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(4): 1–12. (in Chinese)
- [33] 许涛,赵爽,戎天聪,等. 城市内涝的空间分布规律及其与绿地格局的关系[J]. 西部人居环境学刊,2023,38(1):109–117.
XU T, ZHAO S, RONG T C, et al. Spatial Distribution Characteristics of Urban Flooding and Its Relationship with Green Space Pattern [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2023, 38(1): 109–117. (in Chinese)
- [34] 王伟武,汪琴,林晖,等. 中国城市内涝研究综述及展望[J]. 城市问题,2015(10):24–28.
WANG W W, WANG Q, LIN H, et al. Urban Waterlogging in China: A Comprehensive Review and Future Research Prospects [J]. Urban Problems, 2015(10): 24–28. (in Chinese)
- [35] BUCAR R C B, HAYERI Y M. Quantitative flood risk evaluation to improve drivers' route choice decisions during disruptive precipitation [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 219. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108202.
- [36] ZHOU L, WU X H, XU Z S, et al. Emergency decision making for natural disasters: An overview [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 27: 567–576.
- [37] CHO S W, PARK H J, LEE H, et al. Coverage path planning for multiple unmanned aerial vehicles in maritime search and rescue operations [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 161. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107612.
- [38] LIU B S, SHEU J-B, ZHAO X, et al. Decision making on post-disaster rescue routing problems from the rescue efficiency perspective [J]. European Journal of Operational Research, 2020, 286(1): 321–335.
- [39] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs [J]. Numerische Mathematik, 1959, 1: 269–271.
- [40] 蒋慧灵,方伟,徐天锋,等. 基于Dijkstra算法的室内疏散最优路径规划模型[J]. 清华大学学报(自然科学版),2025,65(4): 742–749.
JIANG H L, FANG W, XU T F, et al. Optimal Indoor Evacuation Path-planning Model Based on Dijkstra's Algorithm [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2025, 65(4): 742–749. (in Chinese)
- [41] 赵学健,叶昊,贾伟,等. AGV路径规划及避障算法研究综述[J]. 小型微型计算机系统,2024,45(3):529–541.
ZHAO X J, YE H, JIA W, et al. Survey on AGV Path Planning and Obstacle Avoidance Algorithms [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2024, 45(3): 529–541. (in Chinese)
- [42] LUO M, HOU X R, YANG J. Surface Optimal Path Planning Using an Extended Dijkstra Algorithm [J]. IEEE Access, 2020, 8: 147827–147838.
- [43] ZHOU X W, YAN J W, YAN M, et al. Path Planning of Rail-mounted Logistics Robots Based on the Improved Dijkstra Algorithm [J]. Applied Sciences, 2023, 13(17). DOI: 10.3390/app13179955.
- [44] GUO P, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Selection of optimal escape routes in a flood-prone area based on 2D hydrodynamic modelling [J]. Journal of Hydroinformatics, 2018, 20(6): 1310–1322.
- [45] LI B Y, HOU J M, WANG X H, et al. High-Resolution Flood Numerical Model and Dijkstra Algorithm Based Risk Avoidance Routes Planning [J]. Water Resources Management, 2023, 37(8): 3243–3258.
- [46] 王殿君. 基于改进A*算法的室内移动机器人路径规划[J]. 清华大学学报(自然科学版),2012,52(8):1085–1089.
WANG D J. Indoor Mobile-robot Path Planning Based on an Improved A* Algorithm [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(8): 1085–1089. (in Chinese)
- [47] YOSHUA B. Deep Learning of Representations: Looking Forward [J]. arXiv-CS-Machine Learning, 2013, 46. DOI: arxiv-1305.0445.
- [48] XU X, ZENG J Z, ZHAO Y, et al. Research on global path planning algorithm for mobile robots based on improved A* [J]. Expert Systems with Applications, 2024, 243. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.122922.
- [49] 申腾飞. 基于城市雨洪模型的内涝灾害车辆应急救援路径规划方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2024.

- SHEN T F. Research on Emergency Rescue Path Planning Method for Vehicle Response to Urban Waterlogging Disasters Based on Urban Rainstorm Models [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [50] MOHAMMAD S H N, AL-ARIF S M M R, FERDOUS A H M I, et al. Efficient Algorithm for Automated Rescue Boats [C]//proceedings of the 2012 IEEE 16th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), 2012, 698-702.
- [51] BAHAREH A, LI D Y, ZHANG Z, et al. Feasibility study of urban flood mapping using traffic signs for route optimization [J]. arXiv-CS-Computer Vision and Pattern Recognition, 2021, 187. DOI: 10.48550/arxiv-2109.11712.
- [52] TUNCER A, YILDIRIM M. Dynamic path planning of mobile robots with improved genetic algorithm [J]. Computers & Electrical Engineering, 2012, 38(6): 1564-1572.
- [53] KATOCH S, CHAUHAN S S, KUMAR V. A review on genetic algorithm: past, present, and future [J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 80: 8091-8126.
- [54] CH&ARI I, KOUB&A A, TRIGUI S, et al. SmartPATH: An Efficient Hybrid ACO-GA Algorithm for Solving the Global Path Planning Problem of Mobile Robots [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11 (7). DOI: 10.5772/58543.
- [55] 路耀卓. 基于改进的Dijkstra算法和遗传算法实现的水利调度系统[D]. 长春:吉林大学, 2014.
- LU Y Z. A Water Scheduling System Based on Improved Dijkstra Algorithm and Genetic Algorithm [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [56] OZKAN M F, CARRILLO L R G, KING S A. Rescue Boat Path Planning in Flooded Urban Environments [C]//proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Measurement and Control in Robotics (ISMCR), 2019, 10.
- [57] WANG J F, FAN X L, DING H M. An Improved Ant Colony Optimization Approach for Optimization of Process Planning [J]. The Scientific World Journal, 2014, 15. DOI: 10.1155/2014/294513.
- [58] ALHENAWI E A, KHURMA R A, SHARIEH A, et al. Parallel Ant Colony Optimization Algorithm for Finding the Shortest Path for Mountain Climbing [J]. IEEE Access, 0006, 11. DOI: 10.1109/access.2022.3233786.
- [59] DORIGO M, BIRATTARI M, STUTZLE T. Ant colony optimization [J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006, 1(4):28-39.
- [60] 吴正佳, 周建中, 杨俊杰. 基于蚁群算法的三峡库区洪水优化调度[J]. 水力发电, 2008(2):5-7.
- WU Z J, ZHOU J Z, YANG J J. Flood Dispatching Optimization of Three Gorges Region Based on Ant Colony Algorithms [J]. Water Power, 2008(2): 5-7. (in Chinese)
- [61] 谢小平, 席秋义, 黄强, 等. ACS优化算法在设计洪水计算中的应用研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007(1): 229-234.
- XIE X P, XI Q Y, HUANG Q, et al. The Study on Ant Colony System Optimization Algorithm Applied in Computation of the Design Flood [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2007(1): 229-234. (in Chinese)
- [62] YANG B, WU L W, XIONG J, et al. Location and path planning for urban emergency rescue by a hybrid clustering and ant colony algorithm approach [J]. Applied Soft Computing, 2023, 147. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110783.
- [63] LOKESH K, ARUN C, DR. MOHD N, et al. Speech Recognition with Deep Learning [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1854. DOI: 10.1088/1742-6596/1854/1/012047.
- [64] WANG J, ZHU H D, WANG S H, et al. A Review of Deep Learning on Medical Image Analysis [J]. Mobile Networks and Applications, 2020, 26: 351-380.
- [65] XU L X, CAO B X, XU P, et al. Infrared target detection using deep learning algorithms [J]. Signal, Image and Video Processing, 2023, 17: 3993-4000.
- [66] 刘全, 翟建伟, 章宗长, 等. 深度强化学习综述[J]. 计算机学报, 2018, 41(1):1-27.
- LIU Q, QU J W, ZHANG Z C, et al. A Survey on Deep Reinforcement Learning [J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(1): 1-27. (in Chinese)
- [67] CHEN P Z, PEI J A, LU W C, et al. A deep reinforcement learning based method for real-time path planning and dynamic obstacle avoidance [J]. Neurocomputing, 2022, 497: 64-75.
- [68] LI X Y, LIANG X D, WANG X, et al. Deep reinforcement learning for optimal rescue path planning in uncertain and complex urban pluvial flood scenarios [J]. Applied Soft Computing, 2023, 144. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110543.
- [69] LI X Y, WANG X. Rescue path planning for urban flood: A deep reinforcement learning-based approach [J]. Risk Analysis, 2025, 45(4): 928-943.
- [70] BHARDWAJ R, UPADHYAY A. Cellular Automata [J]. Journal of Organizational and End User Computing, 2017, 29(1). DOI: 10.4018/joec.2017010103.

- [71] QUIROGA C D L, SCHIMIT P H T. A multi-city epidemiological model based on cellular automata and complex networks for the COVID-19 [J]. *Computational and Applied Mathematics*, 2023, 42. DOI: 10.1007/s40314-023-02401-y.
- [72] GUZMAN L A, ESCOBAR F, PEÑA J, et al. A cellular automata-based land-use model as an integrated spatial decision support system for urban planning in developing cities: The case of the Bogotá region [J]. *Land Use Policy*, 2020, 92. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.104445.
- [73] DAS A K, CHATTARAJ U. Heterogeneous Traffic Simulation for Urban Streets Using Cellular Automata [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44: 8557-8571.
- [74] YAO S, CHEN N C, DU W Y, et al. A Cellular Automata Based Rainfall-Runoff Model for Urban Inundation Analysis Under Different Land Uses [J]. *Water Resources Management*, 2021, 35(6): 1991-2006.
- [75] LI B Y, HOU J M, MA Y Y, et al. A coupled high-resolution hydrodynamic and cellular automata-based evacuation route planning model for pedestrians in flooding scenarios [J]. *Natural Hazards*, 2022, 110(1): 607-628.
- [76] HE M N, CHEN C, ZHENG F F, et al. An efficient dynamic route optimization for urban flooding evacuation based on Cellular Automata [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 87. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2021.101622.

Research Progress on Path Planning of Urban Flood Disaster Risk Management

QIU Qingyang¹, LIU Zuwen^{1,2*}, LI Xinyi², TANG Ming², GUO Zhiguo¹

(1. School of Emergency Management and Safety Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. College of Water Conservancy, Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099, China)

Abstract: As an integral element of evacuation strategies and resource scheduling, path planning offers innovative approaches for optimizing flood disaster risk management. This paper first systematically reviews the primary methodologies for flood disaster risk analysis. The overarching framework for flood risk management is then explored further from the perspective of flood simulation integrated with emergency scheduling and digital twin-driven methodologies, focusing on the pivotal role of path planning technology in facilitating emergency scheduling. Based on this, the existing path planning methods are categorized according to algorithmic principles, namely, graph search-based algorithms (such as A* and Dijkstra), heuristic algorithms based on intelligent optimization techniques (including genetic algorithms and ant colony optimization), and adaptive algorithms based on model learning or rule evolution (leveraging techniques like deep reinforcement learning and cellular automata). For each algorithmic category, a thorough analysis dissects its respective advantages, inherent limitations, and specific applications within the challenging context of flood disaster scenarios, considering critical factors such as computational efficiency, solution optimality guarantees, and robustness to dynamic environmental changes. Following this methodological analysis, the paper systematically synthesizes prevailing challenges and unresolved issues in current research, centering on three critical dimensions. The first dimension concerns the challenge of achieving truly dynamic real-time path planning, as the existing algorithms often struggle with the computational latency required to replan optimal paths fast enough in response to the extreme volatility of flood scenarios—characterized by surging water levels, unexpected infrastructure failures, and rapidly emerging hazards—while ensuring robust performance under severe time constraints and potentially incomplete or noisy sensor data. The second dimension highlights the lack of sophisticated, efficient, and transparent multi-objective optimization mechanisms. Effective disaster response necessitates simultaneously optimizing for multiple, often conflicting objectives like minimizing evacuation time, maximizing resource delivery efficiency, ensuring personnel and evacuee safety by avoiding hazardous zones, maximizing the number of people reached, and minimizing operational costs. However, current methods frequently lack robust ways to handle these complex trade-offs, especially with differing priorities or difficult-to-quantify objectives. The third dimension identifies a crucial gap in the tight, bidirectional integration of path planning algorithms with high-fidelity, real-time urban hydrological and hydraulic models. However, path planning dictates movement, the evolving flood inundation fundamentally defines traversability and risk, yet current integration is often loose, offline, or relies on oversimplified flood representations instead of requiring seamless coupling. Specifically, hydrological model outputs dynamically inform the planner's cost

functions, constraints, and traversability graphs, and vice versa. Finally, by outlining prospective research trajectories, the paper anticipates future trends focused on advancing hybrid algorithms combining graph search, metaheuristics, and machine learning for enhanced robustness and efficiency. It develops more expressive and tractable multi-objective optimization frameworks tailored for disaster logistics and fosters deeper integration through standardized interfaces between path planning engines and advanced hydrodynamic simulation platforms (digital twins). Additionally, it leverages edge computing and distributed systems for faster real-time computation and improves the incorporation of human behavior modeling and uncertainty quantification into the planning process to create more resilient and adaptable flood risk management systems.

Keywords: path planning; urban flood disaster; risk analysis; risk management; algorithm model

(责任编辑:程 茜)