

张鹏,冯远俊,王兆礼等. 城市化背景下广东省综合单位线法的适应性改进[J]. 人民珠江, DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

城市化背景下广东省综合单位线法的适应性改进

张鹏¹,冯远俊²,王兆礼²,吴旭树^{2*}

(1. 广州珠科院工程勘察设计有限公司,广东 广州 510610;2. 华南理工大学土木与交通学院,广东 广州 510641)

摘要:随着城市化进程加快,广东省综合单位线法在复杂城市环境下面临适用性挑战,而高精度建模方法又存在过程繁琐、数据要求高等困难。为此,需对广东省综合单位线法进行适应性改进,以提升其在城市化流域暴雨洪水模拟中的精度与实用性。以广州市猎德涌流域为例,构建MIKE FLOOD耦合模型作为基准,系统评估广东省综合单位线法的模拟偏差。在此基础上,提出一种融合排水约束与时滞修正机制的改进方法,通过对单位线进行时空重构,结合排水口蓄排能力与传播时间矩阵进行响应修正,并在流域出口进行延迟叠加,得到修正后的总流量过程线。结果显示:改进后的方法在中高强度降雨下表现优异,洪峰流量相对误差均低于15%,峰现时间偏差不超过10 min,纳什效率系数(NSE)为0.9左右;在低重现期情景下,洪峰流量误差达34.5%,但通过对水深参数进行调整可控制误差在3%左右;所提方法结构简洁、计算高效,能有效改善广东省综合单位线法在城市流域的模拟性能,可为高度城市化地区的防洪排涝设计与雨洪管理提供可靠且实用的技术路径。

关键词:广东省综合单位线法;MIKE FLOOD;径流过程修正;设计洪水;城市化流域;猎德涌

中图分类号:TV121 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-14

广东省综合单位线法作为一种重要的设计洪水计算方法,广泛应用于无资料地区的水文分析^[1-2]。然而,随着城市化进程的加快,流域下垫面特性发生显著变化,同时排水管网密度不断提高,导致产汇流过程呈现出明显的非线性特征^[3-4]。在此背景下,广东省综合单位线法是否仍适用于高度城市化地区,已成为工程实践中亟待解决的关键问题^[5-7]。尽管现代数学模型如SWMM、MIKE系列等可以构建精细化的城市产汇流模拟系统^[8-9],从而提升洪水计算的精度与适应性,但这些模型在构建过程中对数据完整性与精度要求极高,因而在实际工程应用中面临较大的时效性和成本挑战^[10-11]。因此,如何在不依赖高精度、全要素建模的前提下,改

进广东省综合单位线法,使其具备适应高度城市化流域复杂产汇流过程的能力,已成为当前城市水文模拟领域的重要研究方向^[12]。

已有许多学者对广东省综合单位线法做了深入的研究,李整针对现行三角形单位线模型的特点,结合单位线差值平方和最小原则,提出了改进的三角形综合单位线模型^[13],但其未能深入探讨其在高度城市化背景下的适应性问题。马旭民针对广东省综合单位线法在高度城市化地区适用性不足的问题,选取深圳市景田流域提出两种改进方案:一是通过率定单位线滞时和平均后损率优化参数设置,二是采用约束最小二乘法结合网格搜索和交叉验证对单位线形状进行修正^[14]。两种方法均

基金项目:国家自然科学基金项目(52479015),华南理工大学中央高校基本科研业务费杰出青年项目(2024ZYGXZR084)

收稿日期:2026-03-24 **修回日期:**2026-04-25

作者简介:张鹏(1984—),硕士,高级工程师,主要从事城市洪涝防御工作

通信作者:吴旭树(1989—),博士,副教授,主要从事水旱灾害防控研究

联系作者:致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

在一定程度上提升了模型模拟精度,使单位线更贴近城市产汇流特性。姚丽娟以深圳市观澜河流域为例,提出通过基于实测洪水峰现时间来调整单位线汇流参数,使修正后单位线的峰现时间与实测值一致^[15]。上述研究内容虽然能够提升洪水过程模拟精度,但改进方法均仍高度依赖高质量的雨洪资料,难以适用于资料不足或降雨过程复杂的区域,且主要着眼于传统产汇流过程的参数优化,对于城市化背景下因排水网络约束与水流传播特性改变所导致的汇流过程机制变化,仍缺乏系统性研究。

为弥补上述不足,本文以广州市猎德涌流域为例,基于现有地形、管网与水文资料,构建了 MIKE FLOOD 三耦合水动力模型^[16-18],用于评估广东省综合单位线法在复杂城市环境中的适用性^[19-20]。通过对比水动力模型与广东省综合单位线法的模拟结果差异,发现后者在高密度城市流域中存在显著的偏差,尤其在洪峰流量的预测上。为此,本文提出一种结合城市排水系统特征的改进方法,通过引入排水约束与时滞修正机制,重新构建综合单位线法的流量过程模型,以实现其在城市化流域中的适应性改进。这一方法不仅提高了流量过程的准确性,而且使得该模型能够更好地反映城市流域复杂的水文响应,对其他高度城市化地区的洪水模拟与防洪设计具有一定参考价值。

1 研究区概况

猎德涌位于广州市天河区,起源于华南理工大学人工湖,经涵洞过广深铁路后,由北向南于猎德村汇入珠江,见图1。流域面积 16.20 km²,干流长度 6.35 km,干流平均比降 2.23‰。自 20 世纪 80 年代始,猎德涌流域经历了快速的城市扩张,植被覆盖率下降明显^[21-22]。研究通过 Google Earth Engine 提供的数据,分析猎德涌流域在城市化进程中引起的下垫面变化情况,见图2。可以看到猎德涌流域不透水面积占比从 1985 年的 26% 增长到 2023 年的 86%,下垫面特征发生显著改变,使得广东省综合单位线法在当前流域条件下的适用性存在一定不确定性。

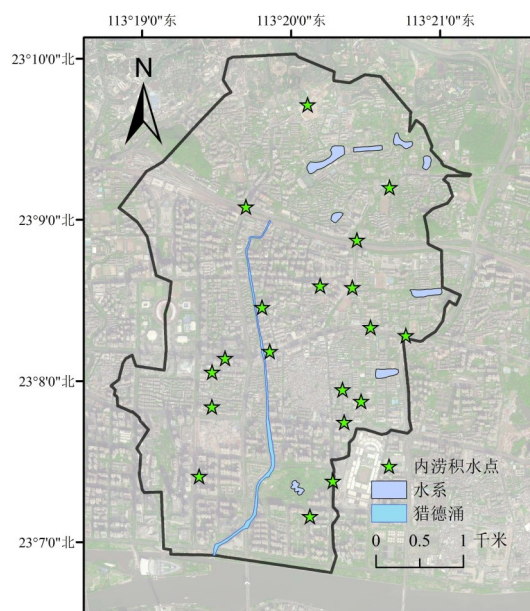


图1 研究区区位

Fig. 1 Location map of the study area

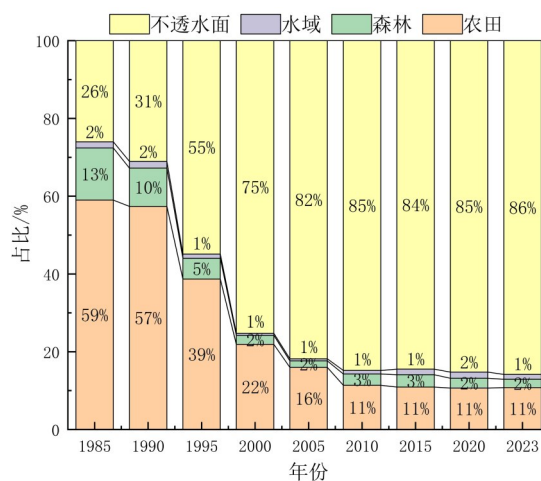


图2 猎德涌流域土地利用演变过程

Fig. 2 Evolution Process of Land Use in the Liude Stream

Basin

2 模型构建及广东省综合单位线法适用性评价

本文采用 MIKE URBAN 模拟研究区降雨径流及一维管网水动力过程^[23-24],采用 MIKE 11 对河道水流进行一维水动力学模拟^[25-26],采用 MIKE 21 反映研究区二维地形特征并模拟二维地表漫流情况^[27-28],并基于 MIKE FLOOD 平台实现 MIKE URBAN、MIKE 11 与 MIKE 21 模型的重耦合^[29]。

本节旨在通过构建并验证高精度的城市雨洪三耦合模型, 以此为基准, 系统评估广东省综合单位线法在复杂城市环境下的模拟偏差, 从而为后文针对该单位线法提出适应性改进提供依据。

2.1 MIKE 11 模型构建

MIKE 11 模型的构建严格遵循一维非恒定流物质-动量双重守恒原理, 即 Saint-Venant 方程组:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 A \cdot R} = 0 \quad (2)$$

式中: x 为距离坐标; t 为时间坐标; A 为过水断面面积; Q 为流量; C 为谢才系数; R 为水力半径; g 为重力加速度。

MIKE 11 模型的构建流程大致为: 首先, 定义河道拓扑结构并输入河道几何形态数据, 接着设定上下游边界条件, 随后配置相应的水力参数(全域曼宁糙率 32、局部值 40 及初始水深 1.5 m), 并设定时间步长 1 s, 时间步数 86 400 步, 最终输入设计降雨数据驱动模型。

2.2 Mike URBAN 模型构建

MIKE URBAN 模型管网模块的水动力计算同样基于一维圣维南方程组。针对城市排水管网中的明渠自由表面流与满管有压流交替现象, 单靠自由表面流理论无法直接求解。为此, 模型引入了普莱斯曼窄缝法, 将满管有压流等效转化为具有自由水面的明渠流:

$$b_s = \frac{gA}{a^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \cdot \left(\frac{\partial H}{\partial t} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad (4)$$

式中: b_s 为封管顶部向上无限延伸的虚拟窄缝的宽度; a 为压力波速; A 为过水断面面积; H 为管道水深; Q 为过水断面流量; t 为时间; x 为沿流动方向距某固定断面的距离; g 为重力加速度; S_f 为阻力坡度; S_0 为管道坡度。

MIKE URBAN 模型的构建流程大致为: 首先, 导入并校验流域内雨水管网数据(雨水井、管线、排水口等), 确保其拓扑连接正确、属性唯一且无高程

矛盾, 同时通过简化次要管网提升模型稳定性。接着基于雨水井位置采用泰森多边形法初步划分汇水区, 并整合空间信息进行精细化调整。最后调整需率定的关键参数(初期损失、沿程损失系数、集水速度等), 通过实测降雨驱动模型并依据水位流量观测数据, 采用试错法反复优化确定最优值^[30], 模型构建结果见图 3a。

2.3 Mike 21 模型构建

MIKE 21 模型以二维 Saint-Venant 方程为控制方程, 采用隐式交替方向(ADI)格式的二维有限差分法求解连续性方程及 X 、 Y 方向的动量方程, 见式 5、6、7。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{p^2}{h} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{pq}{h} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \\ \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right] - \Omega q - fVV_x + \\ \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{q^2}{h} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{pq}{h} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \\ \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial x} \right] + \Omega p - fVV_y + \\ \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: d 为水深; ζ 为水位; h 为 d 、 ζ 之和; p 、 q 分别为 x 、 y 方向上的流量通量, 即单宽流量; C 为谢才系数; g 为重力加速度; Ω 为地球自转科氏力系数; ρ_w 为水的密度; V 、 V_x 、 V_y 分别为风速及风速在 x 、 y 方向上的分量; f 为风阻力系数; p_a 为大气压强; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yy} 为有效剪切力分量。

MIKE 21 模型的构建流程大致为: 首先, 选择水动力模块并导入预处理的地形数据; 接着配置相关计算参数, 包括设置干/湿水深阈值(0.04 m/0.06 m)、恒定曼宁糙率系数(32)及涡黏系数($5 \text{ m}^2/\text{s}$); 然后设定模拟时间步长 0.1 s, 时间步数 864 000 步; 最终通过边界条件定义完成二维水动力框架搭建, 模

型构建结果见图 3b。

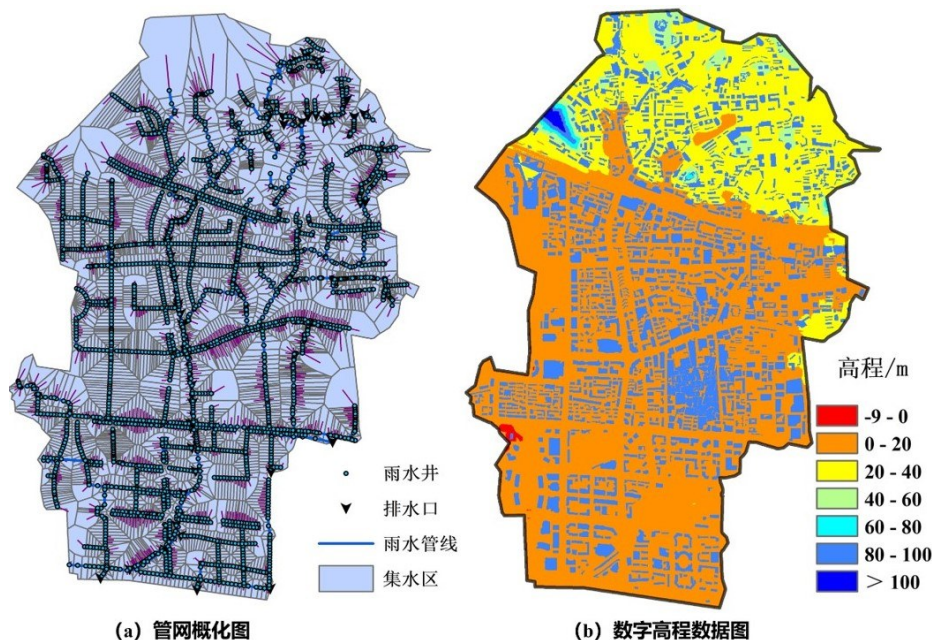


图3 猎德涌流域水动力模型部分建模结果

Fig. 3 Partial Modeling Results of the Hydrodynamic Model of the Liede Stream Basin

2.4 率定验证

研究基于 MIKE FLOOD 平台实现了上述 3 个模型的耦合,构建猎德涌流域三耦合水动力模型。模型验证通过两方面来进行,一是对比模拟的最大淹没水深空间分布与历史内涝点位置的吻合度;二是对比主河道关键节点模拟水位与实测水位动态演变的一致性。通过利用具备高时空分辨率测雨记录、详尽河道水位及内涝积水实测资料的#220423 与#230604 两场降雨驱动 MIKE FLOOD 耦合模型,模拟这 2 场降雨下猎德涌流域最大水深空间分布以及水位变化情况,模拟结果见图 4。

在模拟结果与实际内涝位置的对比中,对于#220423 降雨情景,19 个历史内涝隐患点中有 14 个位于模拟的内涝积水范围内;对于#230604 降雨情景,则有 11 个位于模拟范围内,表明模型在空间上重现内涝位置的能力较好。在水位变化过程验证方面,选取分布于猎德涌主河道上的天河北、天河东、贤人桥和珠江新城等关键实测节点,对比其水位变化过程。结果显示,在#220423 降雨情景下各点位的纳什效率系数(NSE)分别为 0.567、0.811、

0.557;在#230604 降雨情景下各点位的 NSE 值分别为 0.695、0.666、0.597,上述结果表明模型模拟效果较好,可信度较高。

2.5 广东省综合单位线法适用性评价

基于广东省水文局编制的《广东省暴雨参数等值线图》,确定猎德涌流域中心点在历时 $t=24$ h 的设计暴雨统计参数,包括雨量均值、变差系数以及 P-Ⅲ 型分布频率因子。接着计算得到不同频率的点暴雨量,再应用点面转换系数折算,最终获得各重现期下的设计面暴雨量。随后确定设计暴雨在时间尺度上的分布模式,即设计暴雨雨型。鉴于相关研究^[31],广州市单峰降雨事件占比超 70%,故选用单峰芝加哥雨型作为设计降雨的时程分配方案。由于猎德涌这一典型城市化中小流域普遍缺乏长序列的出口断面实测流量数据,研究采用经过严格率定和验证的 MIKE FLOOD 耦合模型,将其输出的流域出口流量过程视为基准,以此替代实测流量数据,并与单位线法的计算结果进行适用性对比分析。

为进行对比验证,采用广东省综合单位线法,

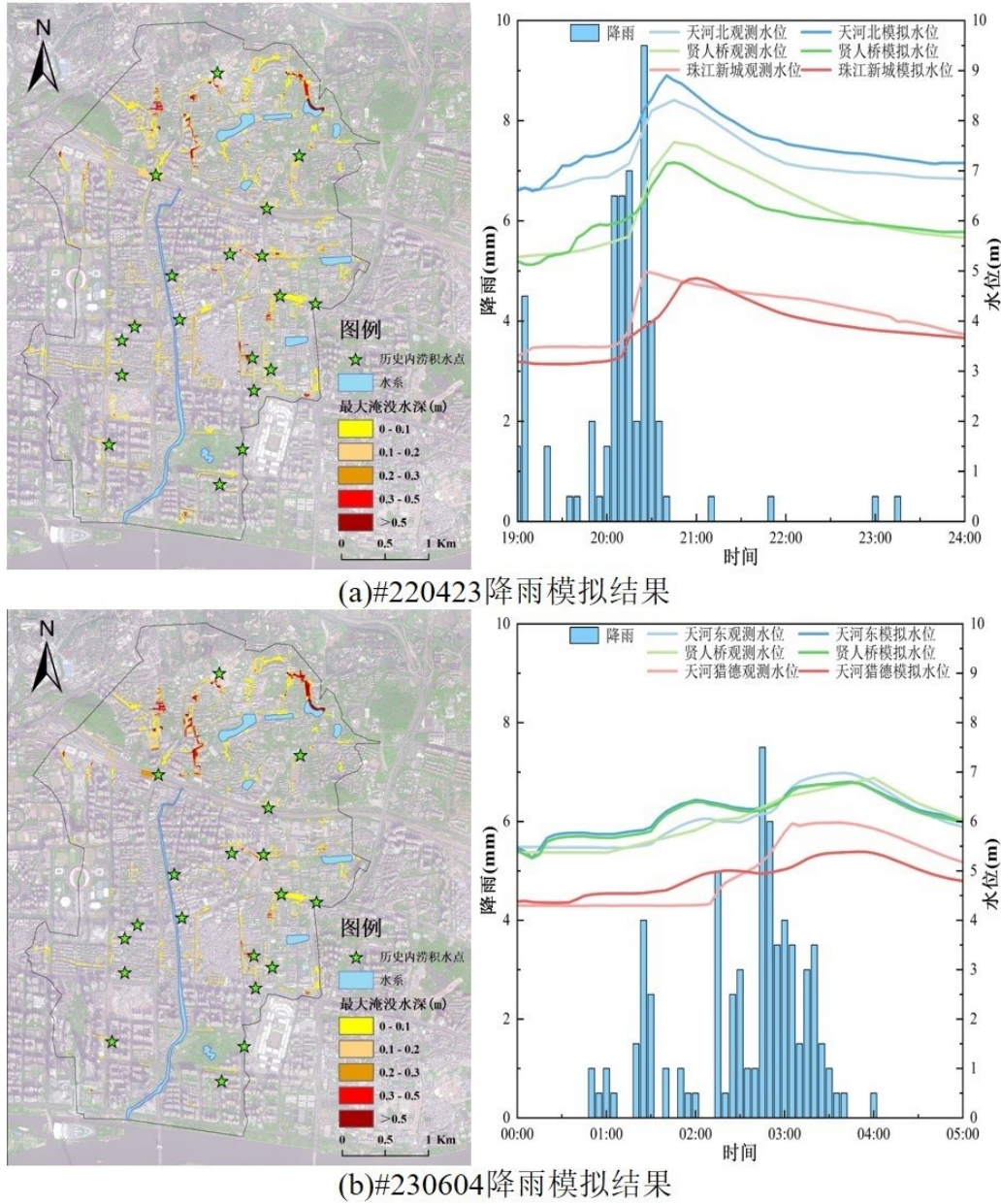


图4 MIKE FLOOD 模型验证(最大水深空间分布图(a)、水位变化情况(b))

Fig. 4 Spatial distribution of maximum water depth (a) and water level variation (b)

依据相同的设计暴雨过程,计算流域出口断面的流量过程线^[32]。猎德涌流域集水区域特征参数 $\theta = L/J^{1/3} = 48.61$;集水区域位于珠江三角洲分区,点面换算系数~历时~集水面积关系曲线采用暴雨地区;产流参数选择粤东沿海、珠江三角洲区,由于工程集水面积 $F=16.20 \text{ km}^2$,小于 100 km^2 ,平均后损率取 4.5 mm/hr ;广东省综合单位线滞时 $m_1 \sim \theta$ 关系曲线选择大陆低区关系曲线(即B线),对应 m_1 取值为

2.45;选择III号无因次单位线 $u_i \sim x_i$,对应 $u_m = 0.750$, $K = v_{u1}/t_p = 1.547$ 。通过上述参数计算猎德涌流域单位线,并根据不同设计频率暴雨情景计算流域出口断面流量过程,并与模型结果进行对比,见图5。

从图5中可以看到,在不同重现期降雨条件下,广东省综合单位线法模拟的洪峰流量普遍高于水动力模型结果,且重现期越大洪峰偏差越显著。同

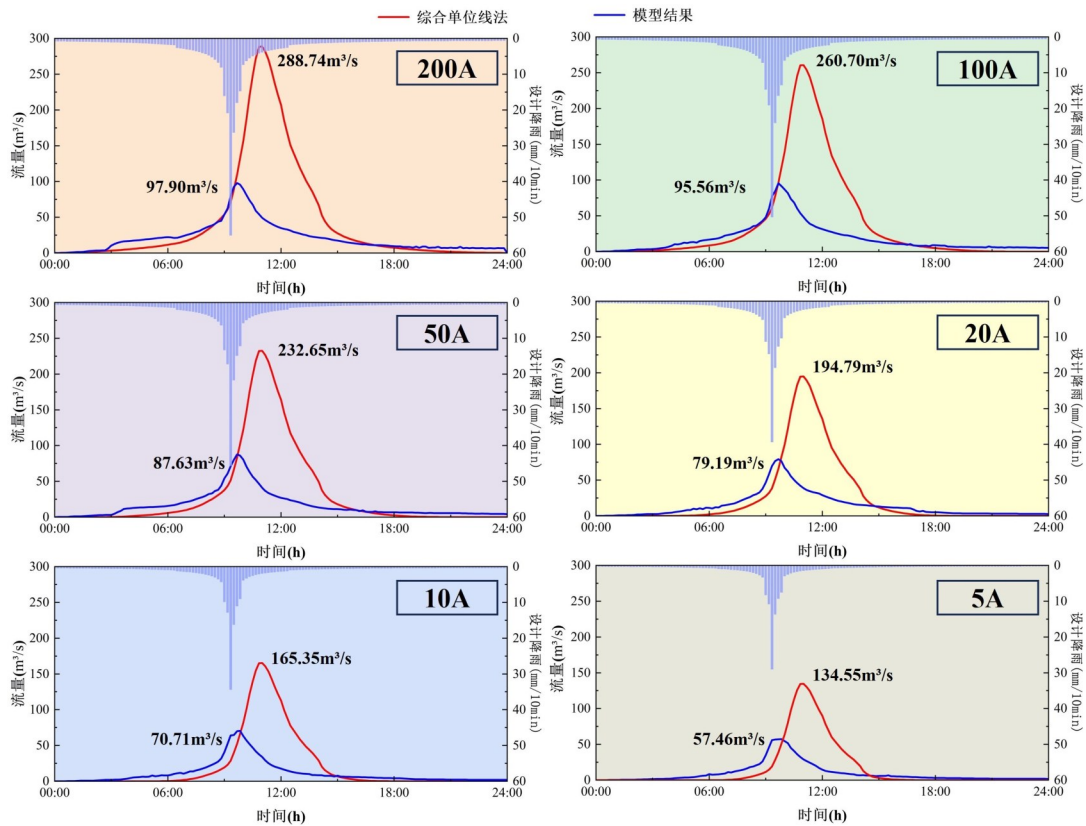


图5 广东省综合单位线法结果与模型结果对比

Fig. 5 Comparison of Flow Hydrographs between the Guangdong Comprehensive Unit Hydrograph Method and the MIKE FLOOD Coupled Model

时,洪峰出现时间普遍延迟 60 ~ 80 min,严重偏离实际排涝响应过程。这种偏差源于单位线法未能准确反映城市化流域中地表滞蓄、管网调蓄及河道延迟等非线性过程,导致洪峰形态和时序与实际情况脱节,显示出其在高度城市化地区适用性显著下降。

3 基于排水约束与时滞修正的综合单位线法改进

广东省综合单位线法未能反映城市排水系统中管网承载能力及汇流时滞等特征,因而在高度城市化地区往往出现流量过程模拟偏差。为此,本文在保留该方法整体框架的基础上,围绕径流响应、排放能力与汇流时滞 3 方面开展城市化适应性改进,为城市雨洪模型的精细化模拟提供新的方法体系,包括下述步骤:①假设降雨对流域具有近似瞬时响应,将综合单位线法计算所得的流量过程集中

于降雨发生时刻,形成新的出口断面流量过程,随后根据排水口与河道的比例关系将该过程流量按时刻均匀分配至各排水节点与河道段,构建空间化的子流量过程集合;②考虑管网存在流量承载上限,构建排水单元的蓄排机制,引入调节因子 α 确定各排水口的最大过流能力,当流量超过最大过流能力时,超出部分转为积水蓄存,当实际流量低于排放能力时,释放前期蓄积量。③基于排水口与河道的几何特征与水力条件,计算水流从各排水单元至流域出口的传播时间,再将所有子流量过程根据其传播时滞进行延时处理,最终在出口处叠加所有修正后的子流量过程,得到新的总流量过程线。

3.1 流量过程重构与空间分配

首先对综合单位线法计算得到的出口断面流量过程进行重构,通过假设降雨引起的径流过程近似瞬时响应,即将某一时刻的降雨立即转化为径流,将原流量过程的滞后部分前移至降雨发生时

刻,形成新的集中型流量过程。以百年一遇设计降雨为例,8:50时刻净雨为6.5 mm,则将该降雨产生的总流量全部赋值于8:50时刻,即8:50时刻的流量值由广东省综合单位线法计算得到的37.71 m³/s调整为150.62 m³/s,从而得到重构后的流量过程。

在完成流量过程重构后,将总流量过程进行空间分配。根据猎德涌流域排水系统布局统计,流域排水管道总长度约87 km,主要排水口数量为54个,另设1条主河道,总长约6.35 km。为简化计算,假设54个排水口在流域内均匀分布,平均每个排水口所对应的管道长度约为1.6 km,主河道长度约为排水口管道平均长度的4倍。接着将总流量过程每一时刻的流量按“排水口:河道=54:4”的比例等分为58份,其中54份对应分配至各排水口,4份对应主河道,最终形成包含54个排水节点与1段河道的55个子流量过程。

3.2 蓄排响应修正

在强降雨条件下,排水系统常受限于管径与坡降,存在显著的排水能力上限,因此通过调节流量超限部分的积蓄与释放,以模拟城市积水与延迟排放过程。以猎德涌流域5个排水口实测流量数据为基础,统计其实测最大过流能力总和,并计算其理论最大过流能力总和,根据实测与理论最大过流能力总和的比值确定调节因子 α ,见表1。该系数用于控制猎德涌流域内所有排水口的最大过流能力。若计算流域并没有实测最大过流能力,可以通过经验选取出参数 α , α 的取值将会影响流量过程的峰值以及退水过程曲线形状。 α 越大峰值将会越大、退水过程越快; α 越小峰值越小,退水过程越慢。理论最大过流能力通过曼宁公式计算得到,公式如下:

$$Q_{\max} = v \times A = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \times \pi R^2 \quad (8)$$

式中: v 为管道内水流速度; A 为管道横截面积; n 为管道糙率; R 为管道半径; S 为平均坡降。

表1所列的各排水口物理参数及其对应的排水限值,在空间上的分布关系见图6。根据前文构建的MIKE FLOOD耦合模型的模拟结果,提取并统计

表1 理论最大过流能力计算表

Table1 Calculation Table of Theoretical Maximum Flow

Rate				
排水口	管道直径 (m)	平均坡降 (%)	糙率	理论最大过流能力(m ³ /s)
1	1.80	2.7	0.013	5.96
2	2.50	5.8	0.013	21.34
3	2.20	5.8	0.013	15.01
4	1.20	1.5	0.013	1.87
5	1.65	1.5	0.013	3.82

得到猎德涌流域5个排水口的最大过流能力总和为19 m³/s,而根据管网物理参数计算出的理论最大过流能力总和为48 m³/s,因此调节因子 α 为0.4,其他排水口的最大过流能力限制为其理论值乘以 α 。当某时刻流量超过某排水口的最大过流能力时,超额部分视为滞蓄量,并在后续排放能力释放后逐步输出。此过程通过蓄水排水双阶段动态模拟,分别处理流量高峰期间的积水累积及退水期的有序释放,具体过程如下:

a)入流超过最大过流能力。超出部分的流量积累到存储量中:

$$\Delta S = (q_{\text{in}} - Q_{\max}) \cdot \Delta t \cdot 3600 \quad (9)$$

出流限制为最大过流能力:

$$q_{\text{out}} = Q_{\max} \quad (10)$$

式中: q_{in} 为当前时刻管道流入流量值; $Q_{\max}$ 为每个排水口管道的最大过流能力; ΔS 为每段时间的蓄水量变化值; q_{out} 为当前时刻管道流出流量值。

b)入流未超过最大过流能力。此时将蓄水排出,可释放水量计算:

$$q_{\text{release}}^{\text{potential}} = Q_{\max} \frac{S}{S_{\max}} \quad (11)$$

计算可用排水余量,即除当前时刻流量外还空余给蓄水排出的流量:

$$q_{\text{available}} = Q_{\max} - q_{\text{in}} \quad (12)$$

实际释放流量取较小值:

$$q_{\text{release}}^{\text{actual}} = \min(q_{\text{release}}^{\text{potential}}, q_{\text{available}}) \quad (13)$$

式中: $q_{\text{release}}^{\text{potential}}$ 为当前时刻蓄水排出量; S 为当前时刻

剩余总蓄水量; $S_{\max}$ 为在每个蓄水阶段中总蓄水量 S 所达到的最大存储量; $q_{\text{available}}$ 为当前时刻空余给积水排出的流量值。

在蓄水阶段,由于流量积累到存储量中, S 上升,当 $S' > S'^{-1}$ 时,更新 $S_{\max} = \max(S_{\max}, S')$;在排水阶段时,由于积水排出, S 下降,当 $S' < S'^{-1}$ 时,保持当前 $S_{\max}$ 不变。

当发生多峰降雨时,可能会出现多次蓄水排水过程,因此每一次蓄水排水过程都会在当前阶段产生 $S_{\max}$,不同阶段的 $S_{\max}$ 需要进行对比以确定排水基准。当新蓄水量 $<$ 历史 $S_{\max}$ 时,维持原有排水基准;

当新蓄水量 $>$ 历史 $S_{\max}$ 时,更新排水基准为新蓄水量 $S_{\max}$ 。

c)实时更新出流与存储量。调整后出流为入流加释放流量:

$$q_{\text{out}} = q_{\text{in}} + q_{\text{release}}^{\text{actual}} \quad (14)$$

存储量则减少释放量对应体积:

$$\Delta S = -q_{\text{release}}^{\text{actual}} \cdot \Delta t \cdot 3600 \quad (15)$$

最后对所有排水口进行统一处理,得到每个排水口对应管道内的修正后流量过程,其中不对河道的最大过流能力进行限制。上述排水约束下的水量调蓄与释放逻辑见图6。

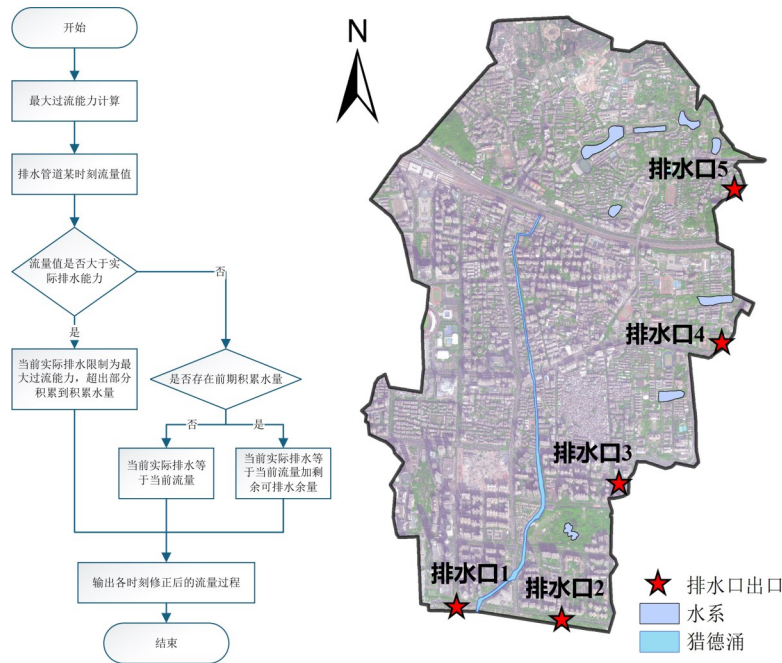


图6 蓄排响应修正流程图及排水口空间分布示意

Fig. 6 Flowchart of the storage and drainage response correction and schematic diagram of the spatial distribution of drainage outlets

3.3 传播时滞计算与总流量过程叠加

为模拟城市排水系统中径流的输移特性,将传播时滞划分为2个阶段:一是排水口内部管道传播时间,二是河道内水流至流域出口的传播时间。

a)排水口管道内传播时间计算。在考虑了蓄排响应后得到新的流量过程后,依据各排水口的管径、平均坡降及管道平均长度,采用曼宁公式估算排水口内水流速度,计算出每个排水口从最远点至

流入河道所需的最大传播时间。将蓄排响应修正后某一时刻得到的流量值视为沿排水口所在管道长度上均匀分布,接着根据该排水口的最大传播时间,将该流量划分为多个时间段延迟注入河道。由于计算时间精度为10 min,每一段管道上的流量根据其传播时间被分配至相应时间节点,并在相同时刻进行流量叠加。例如,若某排水口的最大传播时间为12 min,若其在10:00时刻的流量为18 m³/s,则

该时刻流量中 5/12 的部分将于当前时刻(10:00)注入河道,其余流量延迟至下一时刻(10:10)注入;若最大传播时间为 20 min,则该流量将按比例划分为三段,分别在 10:00、10:10 和 10:20 注入河道,对应比例为 5/20、10/20 和 5/20。

b)河道段传播时间计算。依据猎德涌河道长度、平均断面宽度与比降,采用矩形断面假设水深 1.5 m 与曼宁公式分段估算河道流速,计算得到最远段到流域出口的传播时间,见表 2。

表 2 河道各段传播时间计算
Table2 Calculation of Transmission Time for Each Section of the River Channel

河段	河长/km	平均宽度/m	平均坡降/‰	流速/(m·s ⁻¹)	传播时间/min
猎德涌河口至金穗桥河段	1.20	28.5	2.23	1.86	10.75
金穗桥至黄埔大道河段	0.60	42.5	2.23	2.11	4.74
黄埔大道至天河路河段	0.70	20.5	2.23	1.68	6.94
天河路至广深铁路河段	1.80	11.5	2.23	1.42	21.13
广深铁路至剩余河段	2.05	10.0	2.23	1.32	25.88

猎德涌流域共有 54 个排水口,其中 5 个位于河口处,视为无传播延迟(传播时间为 0);23 个位于河道最上游区域,传播时间统一设为河道最大传播时滞 69.44 min;其余 26 个位于河道中段,简化视为沿河道等间距分布,其传播时间按位置线性插值确定。所有河道段流量在完成管道传播修正后,进一步按该传播时间进行延迟叠加,模拟河道汇流的非同步特性。

最后,结合排水口至河道的传播延迟与河道至出口的二次传播延迟,分别对所有子流量过程进行双阶段延迟修正。所有排水口及河道段在河口处的流量过程经延迟叠加后,形成最终的总流量过程线。

3.4 模拟结果与适用性分析

为验证所提方法的有效性,将修正后的流量过程与 MIKE FLOOD 水动力模型结果进行对比分析,见图 6。结果显示,在 200、100、50 和 20 年一遇设计降雨情景下,修正后的洪峰流量与水动力模型的相对误差均控制在 15% 以内,峰现时间差异小于 10 min,整体过程线拟合度良好,表现出较强的模拟精度与工程适用性。在 10、5 年一遇降雨情景下,修正后的洪峰流量误差分别为 19.0% 与 34.5%,拟合效果略有下降,洪峰出现时间与模型基本一致。

值得指出的是,依据猎德涌初步设计报告,上述计算中河道段的水深统一取值为 1.5 m。由于河道水深直接影响曼宁公式中的流速与传播时间,其取值对模拟结果具有一定敏感性。为进一步探究参数影响并验证“瞬时重构”假设的合理性,额外进行以下对比试验:①调整各重现期下的河道水深,以达到优化洪峰拟合效果;②取消“瞬时重构”步骤,直接基于原单位线流量过程进行修正。各试验结果均与同重现期下模型的模拟结果进行对比,见表 3。

表 3 中结果表明,通过适当调整河道水深,洪峰流量误差可进一步缩小至 3 % 左右,峰现时间误差变化不大,NSE 指数有所降低但仍保持较高水平。这表明在所提基于排水约束与时滞修正的综合单位线改进方法中,可进一步根据实际情况对水深参数进行动态校准,以提升低重现期下的模拟精度。另一方面,若不进行“瞬时重构”,即保留原单位线的时序分布,则在中高重现期下修正后的洪峰误差显著增大,峰现时间延迟 100 min 左右,NSE 指数普遍偏低甚至为负值。这说明“瞬时重构”假设在所提基于排水约束与时滞修正的综合单位线改进方法中是合理的,避免因单位线固有滞后性导致的系统性偏差。

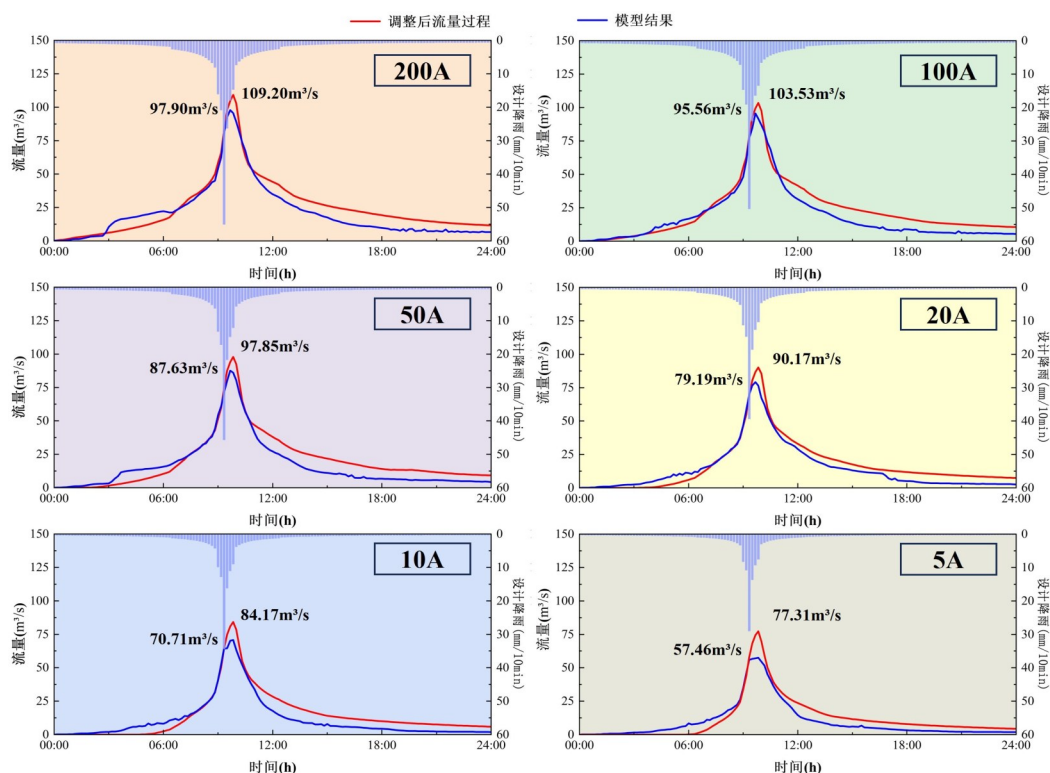


图7 广东省综合单位线法修正后结果与模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of the Improved Unit Hydrograph Method Results with MIKE FLOOD Simulation Results

需要指出的是,上述方法在构建过程中采用了“排水口均匀分布”和“管道传播时间线性分配”的简化假设。这虽使模型结构简洁、便于应用,但在管网空间异质性高或水力响应非线性强的区域,可能引入一定偏差。未来工作可考虑结合分布式排水单元划分或引入机器学习辅助的传播时间估算,以进一步降低模型结构不确定性并提升其在复杂城市环境中的适用性。并且由于不同排水口所处管网的淤积状况以及设计标准存在差异,选取不同的排水口样本可能会导致调节因子的计算结果存在一定波动,进而对流量峰值及退水过程的模拟产生局部影响。但在宏观的流域尺度上,由于城市管网系统具有连通性且整体设计标准趋同,基于主要核心排水口统计得出的平均 α 值,已经能够较好地反映流域整体的排水折减水平。未来若能引入更为全面的城市管网监测数据,进一步推求空间分布式,将有望进一步提升改进方法的模拟精度。

综上所述,所提基于排水约束与时滞修正的综

合单位线改进方法在中高强度设计降雨下表现稳定可靠,可较好地刻画城市产汇流过程;在低强度设计降雨下可根据实际情况对水深参数进行动态校准,以提升模拟精度。该方法具有结构简明、数据需求低与计算高效的特点,适用于资料有限的城市化流域洪水模拟,为高度城市化地区工程设计与

4 结语

本文提出基于排水约束与时滞修正的方法改进广东省综合单位线法,总结如下。

a)通过遥感数据分析得到猎德涌流域的地表不透水面积从1985年的26%增长至2023年的86%,表明城市化进程显著加剧了流域的不透水面积比例。

b)基于猎德涌流域的地形与管网信息,构建了MIKE FLOOD三耦合模型。模型的模拟结果与实际情况较为吻合,表明该模型能较好地反映流域内涝情况和水位变化,具有较高的可靠性。

表3 各重现期下不同改进情景的模拟精度对比
Table3 Comparison of simulation accuracy under different improvement scenarios for each Return Period

重现期/ 年	模拟情景	水深取 值/m	NSE	洪峰误 差/%	峰现时间误 差/min
200	标准修正	1.50	0.882	11.5	10
	水深校准	1.40	0.876	1.4	10
	无重构对比	1.40	0.152	31.6	100
100	标准修正	1.50	0.895	8.3	10
	水深校准	1.40	0.892	1.4	20
	无重构对比	1.40	0.108	22.1	100
50	标准修正	1.50	0.859	11.7	10
	水深校准	1.40	0.844	2.0	20
	无重构对比	1.40	-0.089	18.9	100
20	标准修正	1.50	0.915	13.9	10
	水深校准	1.20	0.894	2.8	20
	无重构对比	1.20	0.034	17.4	100
10	标准修正	1.50	0.838	19.0	0
	水深校准	1.10	0.804	3.3	0
	无重构对比	1.10	-0.332	21.3	90
5	标准修正	1.50	0.834	34.5	0
	水深校准	0.75	0.782	2.2	0
	无重构对比	0.75	-0.459	20.3	90

c)通过 MIKE FLOOD 三耦合模型模拟不同重现期下的流域出口流量过程,并与广东省综合单位线法计算得到的流量过程进行对比。结果表明,广东省综合单位线法模拟的洪峰流量普遍高于水动力模型结果,且洪峰出现时间普遍延迟,严重偏离实际排涝响应过程,表明广东省综合单位线法不再适用于高度城市化地区。

d)提出的基于排水约束与时滞修正的改进方法,在中高强度降雨情景下表现优异,洪峰流量误差控制在 15% 以内,峰现时间偏差 10 min 左右,显著提升了模拟精度。在低强度降雨下虽仍存在一定误差,但通过参数调整可进一步优化,显示出该方法在城市化流域洪水模拟中具有良好的适用性。

本文聚焦于广东省综合单位线法在城市化流

域中的适应性改进,提出了一种基于排水约束与时滞修正的流量过程改进方法。研究表明,改进后的方法能够较好地模拟城市流域的排水过程,可为类似城市化流域的洪水管理和防治提供理论依据和实践指导。

参考文献:

[1] 管一, 龙岩, 康爱卿, 等. 基于综合单位线法推求水库设计洪水分析[J]. 海河水利, 2023(8):43-46.
Guan Yi, Long Yan, Kang Aiqing, et al. Analysis of reservoir design flood estimation based on the comprehensive unit hydrograph method[J]. Haihe Water Resources, 2023(8): 43-46. (in Chinese)

[2] 李弘力. 用水文站实测资料验证广东省综合单位线法设计洪水精度[J]. 云南水力发电, 2024, 40(11):26-28, 48.
Li Hongli. Verification of design flood accuracy of Guangdong comprehensive unit hydrograph method using measured data from hydrological stations[J]. Yunnan Water Power, 2024, 40(11): 26-28, 48. (in Chinese)

[3] 张业彤, 王海涛, 柴禾蕾. 城市下垫面对地表水文循环过程的影响分析——以长春市为例[J]. 国土与自然资源研究, 2022(5):42-45.
Zhang Yetong, Wang Haitao, Chai Helei. Analysis of the influence of urban underlying surface on surface hydrological cycle process: A case study of Changchun City[J]. Land and Natural Resources Research, 2022(5): 42-45. (in Chinese)

[4] 李岩. 城市化与水生态环境协调发展度定量评估[J]. 水利规划与设计, 2024(8):78-81.
Li Yan. Quantitative assessment of coordinated development degree between urbanization and water ecological environment [J]. Water Resources Planning and Design, 2024(8): 78-81. (in Chinese)

[5] 林友勤, 朱振洋, 李玉玲, 等. 综合单位线在洪水预报中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2024(10):25-31, 39.
Lin Youqin, Zhu Zhenyang, Li Yuling, et al. Application of comprehensive unit hydrograph in flood forecasting [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(10): 25-31, 39. (in Chinese)

[6] 王强, 许有鹏, 于志慧, 等. 快速城市化地区多尺度水文观测试验与暴雨洪水响应机理分析[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 743-753.
Wang Qiang, Xu Youpeng, Yu Zhihui, et al. Multi-scale hydrological observation experiment and analysis of storm flood

- response mechanism in rapidly urbanizing areas[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(5): 743–753. (in Chinese)
- [7] 钟芳倩, 霍艾迪, 赵志欣, 等. 基于 HEC-HMS 的黄土高原沟壑区流域城市化对洪水情势的影响[J]. *人民黄河*, 2024, 46(2): 67–72, 79.
- Zhong Fangqian, Huo Aidi, Zhao Zhixin, et al. Impact of urbanization on flood regime in the Loess Plateau gully region based on HEC-HMS[J]. *Yellow River*, 2024, 46(2): 67–72, 79. (in Chinese)
- [8] 王正川, 张扬, 赛佳美, 等. 基于 MIKE 模型的排涝泵站治涝能力评估——以深圳市上下村排涝片区为例[J]. *人民珠江*, 2025, 46(S2): 4–6.
- Wang Zhengchuan, Zhang Yang, Sai Jiamei, et al. Assessment of drainage pumping station capacity based on MIKE model: A case study of Shangxiacun drainage area in Shenzhen[J]. *Pearl River*, 2025, 46(S2): 4–6. (in Chinese)
- [9] 李港奥, 刘沛显, 赵禹博, 等. 基于 HEC-HMS 的海浪河洪水模拟研究[J]. *黑龙江水利科技*, 2025, 53(8): 17–21.
- Li Gang'ao, Liu Peixian, Zhao Yubo, et al. Flood simulation study of Hailang River based on HEC-HMS[J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2025, 53(8): 17–21. (in Chinese)
- [10] 夏铭辉, 尹世洋. 基于 SWMM 耦合 HEC-RAS 的人工建设水网防洪排涝模拟研究[J]. *人民珠江*, 2024, 45(6): 30–38.
- Xia Minghui, Yin Shiyang. Simulation study of flood control and drainage in artificially constructed water networks based on SWMM coupled with HEC-RAS[J]. *Pearl River*, 2024, 45(6): 30–38. (in Chinese)
- [11] Chen Chaohui, Zhang Yindong, Lou Yihan, et al. Impact of Refined Boundary Conditions of Land Objects on Urban Hydrological Process Simulation[J]. *Water*, 2024, 13(11). DOI:10.3390/w13111808.
- [12] Zhang Peng, Feng Yuanjun, Wang Zhaoli, et al. Improved Comprehensive Flood Risk Index Method and Multi-Scenario Flood Simulation for Downstream Area of the Reservoir[J]. *Water*, 2024, 14(15). DOI:10.3390/w14152789.
- [13] 李整, 陈代海, 刘琼. 广东省改进综合单位线法洪峰流量计算方法研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(11): 2377–2383.
- Li Zheng, Chen Daihai, Liu Qiong. Study on calculation method of peak discharge for improved comprehensive unit hydrograph method in Guangdong[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(11): 2377–2383. (in Chinese)
- [14] 马旭民, 林凯荣, 郭伟建, 等. 城市化背景下广东省综合单位线法的评估与修正[J]. *中国农村水利水电*, 2024(1): 142–149.
- Ma Xumin, Lin Kairong, Guo Weijian, et al. Evaluation and modification of Guangdong comprehensive unit hydrograph method under urbanization background[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(1): 142–149. (in Chinese)
- [15] 姚丽娟, 薛冰贤, 吴辉明. 高度城镇化流域广东省综合单位线应用研究[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(12): 108–114.
- Yao Lijuan, Xue Bingxian, Wu Huiming. Study on application of Guangdong comprehensive unit hydrograph in highly urbanized watershed[J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(12): 108–114. (in Chinese)
- [16] Li Yanbin, Li Hongxing, Han Yuhang, et al. Impact analysis of urban super-standard flood disasters based on MIKE+[J]. *Natural Hazards*, 2025, 121(13): 15949–15963.
- [17] 王忠伟. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟及排水系统优化[J]. *陕西水利*, 2025(6): 21–24.
- Wang Zhongwei. Urban waterlogging simulation and drainage system optimization based on MIKE FLOOD coupled model[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2025(6): 21–24. (in Chinese)
- [18] Tuan A L, Van T C, Binh V D, et al. Flood modeling in the Ba River basin using a coupled hydrodynamic model—MIKE FLOOD[J]. *River*, 2024, 3(2): 199–207.
- [19] 袁银, 葛均建, 李政鹏, 等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城区上游水库溃坝洪水模拟研究[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(6): 159–165, 193.
- Yuan Yin, Ge Junjian, Li Zhengpeng, et al. Simulation study of dam-break flood in upstream reservoir of urban area based on MIKE FLOOD coupled model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(6): 159–165, 193. (in Chinese)
- [20] 程麒麟, 刘霖皓, 刘非, 等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型模拟的城市内涝对道路安全风险的影响评估[J]. *中国农村水利水电*, 2024(8): 94–104.
- Cheng Qiming, Liu Linhao, Liu Fei, et al. Impact assessment of urban waterlogging on road safety risk based on MIKE FLOOD coupled model simulation[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(8): 94–104. (in Chinese)
- [21] 梁汝豪, 兰甜, 林凯荣, 等. 基于 SWMM 的城市雨洪径流模拟研究——以广州市猎德涌流域为例[J]. *人民珠江*, 2018, 39(6): 1–5, 15.
- Liang Ruhao, Lan Tian, Lin Kairong, et al. Simulation study of urban stormwater runoff based on SWMM: A case study of Liede Stream Basin in Guangzhou[J]. *Pearl River*, 2018, 39(6): 1–5, 15. (in Chinese)
- [22] Nguyen Chi Cong, Nguyen Binh Quang, Le Xuan Cuong, et al. Urban inundation forecasting based on hydraulic models coupling

- MIKE Flood and MIKE Urban: A case study of Tam Ky City, Vietnam[J]. *River*, 2023, 2(4): 518–529.
- [23] 张旭兆, 徐辉荣, 王鑫. 广州市猎德涌内涝模拟与成因分析[J]. *广东水利水电*, 2019(3): 16–21.
- Zhang Xuzhao, Xu Huirong, Wang Xin. Simulation and cause analysis of waterlogging in Liede Stream, Guangzhou [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2019(3): 16–21. (in Chinese)
- [24] Liu Yin, Zhang Shuanghu, Su Huidong, et al. Modelling and Application of Urban Drainage Based on Mike Urban Model[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 474. DOI:10.1088/1755-1315/474/6/062003.
- [25] Dhruw G, Agrawal N, Jaiswal K R. Rainfall-runoff Modelling Using MIKE11 NAM Model for Ravishankar Sagar Catchment, Chhattisgarh, India[J]. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2024, 14(4): 719–738.
- [26] Shigute A N, Kumar T L, Atlabachew A E, et al. Evaluating the dynamics of hydroclimate and streamflow for data-scarce areas using MIKE11–NAM model in Bilate river basin, Ethiopia[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2022, 8(4): 4563–4578.
- [27] 汪志鹏. 基于 MIKE21 的典型山丘区河道行洪能力分析——以浮梁县东河流域为例[J]. *长江技术经济*, 2025, 9(5): 24–28, 36.
- Wang Zhipeng. Analysis of flood conveyance capacity of typical hilly area rivers based on MIKE21: A case study of Donghe River Basin in Fuliang County [J]. *Yangtze River Technology and Economy*, 2025, 9(5): 24–28, 36. (in Chinese)
- [28] Guo S, Zhang Y, Zhang X, et al. Simulation study of reservoir water environment based on Mike21-taking Baisha reservoir as an example [J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2025, 109101522–101522.
- [29] 张泽毅, 郑何声园. Mike Flood 模型在南方河网地区内涝风险评估中的应用研究[J]. *水上安全*, 2025(20): 76–78.
- Zhang Zeyi, Zheng He Shengyuan. Application study of Mike Flood model in waterlogging risk assessment of southern river network areas[J]. *Water Safety*, 2025(20): 76–78. (in Chinese)
- [30] Yan Xinghui, Du Feng, Zhang Tianqi, et al. Predicting the Flow Fields in Meandering Rivers with a Deep Super-Resolution Convolutional Neural Network [J]. *Water*, 2024, 16(3): 425. <https://doi.org/10.3390/w16030425>.
- [31] 马雨露, 赖成光, 习树峰, 等. 南方高度城市化地区极端降雨特征分析及阈值确定——以深圳市为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(2): 76–81.
- Ma Yulu, Lai Chengguang, Xi Shufeng, et al. Analysis of extreme rainfall characteristics and threshold determination in highly urbanized areas of southern China: A case study of Shenzhen [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(2): 76–81. (in Chinese)
- [32] 练迪, 王京晶, 王宁. 缺资料流域中小河流洪水预报研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(S1): 244–249.
- Lian Di, Wang Jingjing, Wang Ning. Study on flood forecasting for small and medium rivers in data-scarce basins [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(S1): 244–249. (in Chinese)

Adaptive Improvement of the Guangdong Comprehensive Unit Hydrograph Method in the Context of Urbanization

ZHANG Peng¹, FENG Yuanjun², WANG Zhaoli², WU Xushu^{2*}

(1. Guangzhou Zhukeyuan Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Guangzhou 510610, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization, the Guangdong Comprehensive Unit Hydrograph Method (GDUH)—a standard approach for design flood estimation in ungauged basins—faces growing applicability challenges in complex urban environments. In the Liede Stream Basin of Guangzhou, for instance, the impervious surface ratio surged from 26% in 1985 to 86% in 2023, drastically altering rainfall-runoff processes. At the same time, high-precision physically-based models such as the MIKE series remain data-intensive and often impractical for routine engineering. An adaptive improvement of GDUH is therefore urgently needed to enhance its accuracy and practicality for storm flood simulation in urbanized catchments without resorting to full-scale modeling. Taking the Liede Stream Basin as a case study, a MIKE FLOOD coupled model integrating MIKE URBAN, MIKE 11 and MIKE 21 was first established and rigorously calibrated using observed water levels and inundation data from two historical rainfall events. This

model served as a benchmark to systematically evaluate the simulation deviations of the traditional GDUH under design rainfall scenarios with return periods ranging from 5 to 200 years. The evaluation revealed that the traditional method consistently overestimates peak discharges and delays peak timing by 60 – 80 minutes, indicating significant inadequacy for highly urbanized watersheds. To address these deviations, an improved approach coupling drainage constraints with a time-delay correction mechanism was proposed. The method comprises three steps: ① temporal-spatial reconstruction—assuming instantaneous rainfall-runoff response, the original GDUH hydrograph is concentrated at the time of rainfall and then proportionally distributed to 54 drainage outlets and the main river; ② storage-drainage correction—an adjustment factor α (calibrated as 0.4 for the Liede Basin) limits the maximum conveyance capacity of each outlet, temporarily storing excess inflow and gradually releasing it when capacity becomes available, thereby mimicking urban ponding and delayed drainage; ③ time-delay superposition—a propagation time matrix is constructed using Manning's equation for both pipeline and river segments, all sub-runoff processes are delayed correspondingly and superimposed at the basin outlet to form the revised total flood hydrograph. Results show that the improved method performs excellently under moderate- to high-intensity rainfall (return periods ≥ 20 years), with relative peak flow errors below 15%, peak time deviations within 10 minutes, and Nash – Sutcliffe efficiency coefficients around 0.9. Under low return periods (5- and 10-year), the standard correction yields peak errors of 34.5% and 19.0%, but these errors can be reduced to approximately 3% by dynamically calibrating the channel water depth parameter, which governs flow velocity and propagation time. Comparative experiments without resorting to full-scale modeling confirmed that the instantaneous reconstruction step is essential: without it, peak time delays of 90 – 100 minutes persist and NSE values drop markedly. The proposed method is structurally simple, computationally efficient and imposes low data requirements. It effectively improves GDUH's simulation performance in urban catchments and provides a reliable, practical technical pathway for flood control design and stormwater management in highly urbanized regions.

Keywords: Guangdong Comprehensive Unit Hydrograph Method; MIKE FLOOD; runoff process modification; design flood; urbanized catchment; Liede Stream

(责任编辑:李泽华)