

基于排水能力分析的贵阳市内涝模拟

潘 岑¹, 邹楠婷², 陈 军², 唐延婧¹, 宋坤杰¹

(1. 贵州省气象服务中心, 贵州 贵阳 550002; 2. 成都信息工程大学资源环境学院, 四川 成都 610225)

摘要:针对贵阳市主城区因地形复杂、管网资料缺失导致内涝模拟精度受限的问题,提出了一种基于排水能力分析的复杂地形城市内涝模拟方法。该方法以全分布式径流模拟模型为基础,构建了复杂地形条件下支持排水输出的城市内涝模拟框架,并基于随机森林算法构建了排水能力与水深的双向预测模型,进而利用历史灾情个例结合降水数据对贵阳市内涝过程进行预测。2024 年 6 月 29 日内涝模拟试验结果表明 16 个历史涝点中有 12 个涝点被准确模拟,模型模拟精度达到了实用化要求。

关键词:城市内涝模拟;排水能力分析;径流模拟模型;随机森林算法;贵阳市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0034-08

Waterlogging simulation in Guiyang City based on drainage capacity analysis//PAN Cen¹, ZOU Nanting², CHEN Jun², TANG Yanjing¹, SONG Kunjie¹ (1. *Guizhou Meteorological Service Center, Guiyang 550002, China*; 2. *College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China*)

Abstract: A complex terrain urban waterlogging simulation method based on drainage capacity analysis is proposed to address the problem of limited accuracy in simulating waterlogging in the main urban area of Guiyang City due to complex terrain and lack of pipeline data. The method is based on a fully distributed runoff simulation model, and constructs an urban waterlogging simulation framework that supports drainage output under complex terrain conditions. Based on the random forest algorithm, a bidirectional prediction model of drainage capacity and water depth is constructed, and historical disaster cases combined with precipitation data are used to predict the waterlogging process in Guiyang City. A flood simulation experiment was conducted on June 29, 2024, and the results showed that 12 out of 16 historical flooding points were accurately simulated, and the model simulation accuracy met the practical requirements.

Key words: urban waterlogging simulation; drainage capacity analysis; runoff simulation model; random forest algorithm; Guiyang City

随着城市化进程的加快,城市内涝问题已成为全球范围内城市可持续发展面临的重大挑战之一^[1-3]。城市内涝模拟可提升内涝预警能力,减少灾害损失,增强应急响应能力^[4-5]。内涝模型是目前城市内涝模拟的主流方法,其通过收集城市的高程、地下管网等资料,演算地表径流和管网径流,从而实现内涝风险预警。目前研究中常用的内涝模型有 SWMM^[6-7]、SWAT^[8]、InfoWorks ICM^[9-10]、MIKE FLOOD^[11-12]、STORM^[13]、BP 神经网络模型^[14]、HSPF 模型^[15]、城市排水管网模拟模型^[16]、基于 GIS 的城市水文和水动力学模型^[17]、基于 K 近邻和水动力模型^[18]、SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合数值模

型^[19-21]、CNN-LSTM-ATT 模型^[22]等。大部分内涝模型对管网数据要求较高,不仅要求准确的管网基础数据,还需要实时管网状态数据,很多城市缺乏完整的管网资料储备,导致模型模拟精度降低^[23]。对于管网资料缺失地区进行城市内涝模拟,目前研究中主要采取两种方法。一是管网结构概化方法,例如,徐慧珏^[24]通过提取排水系统出水口节点,逆向构建了管网主干枝状拓扑结构;臧文斌^[25]建立了地表-河道排水等效模型,借助河道与管网排放口的空间关联实现洪水过程模拟。然而,此类方法依赖人工设定的简化规则,其拓扑重建精度受主观因素影响显著,在模拟效果上存在一定局限性。二是管网排

基金项目:贵州省气象局省市联合科研基金项目(黔气科合 SS[2023]06 号);贵州省气象局气象科技创新团队项目(黔气科合 TD[2024] 01 号);贵州省气象局科研业务项目(黔气科登[2024]08-01 号)
作者简介:潘岑(1992—),女,工程师,硕士,主要从事应用气象服务研究。E-mail:fy3pancen@163.com
通信作者:唐延婧(1982—),女,副高级工程师,主要从事应用气象服务研究。E-mail:370128885@qq.com

水能力概化,例如,Wang 等^[26]通过对比降雨折现率法与固定入渗率法,评估了两种土壤入参与管网排水联合表征方式的适用性;杨东等^[27]提出了3类区域化处理方案,包括全域下渗增强、道路局部下渗修正及雨水井等效排水;李东来^[28]推导了雨水井流量修正公式,建立了基于管网设计能力的定量等效模型;杜佳锴等^[29]采用径流曲线数(CN 值)调整法,通过修正不同土地利用类型的 CN 值实现排水能力等效;都利亚^[30]进一步优化了道路 CN 值的确定算法,提升了该方法的可靠性;侯精明等^[31]提出了一种基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型,通过等效下渗法将管网排水效果进行简化。但这类方法常采用简化的静态排水量来表征管网排水能力,忽略了实际管网汇流的动态过程^[32]。另外,英国环境署提出的降水量折减法通过双重削减降水量分别反映土壤下渗和管网排水的影响^[33],然而该方法仅对降雨输入项进行修正,未能充分考虑地表产汇流的完整物理过程。

贵阳市作为我国西南地区的重要城市,由于城市排水防涝系统建设滞后,城市道路雨水收集系统损坏堵塞严重等问题,近年来频繁遭受暴雨引发的内涝灾害,给城市的基础设施和居民生活带来了严重影响。本文提出一种基于排水能力分析的贵阳市城市内涝模拟方法,以地表径流汇流为基础,对于每一个易涝点构建不同排水能力的内涝水深预测模型,以解决现有模型管网排水能力概化静态简化的问题,实现在排水管网数据缺少的情况下进行贵阳市易涝点水深精确预测。

1 研究区概况

贵阳市地处黔中山原丘陵中部,地理位置为 $26^{\circ}11'N \sim 27^{\circ}22'N$ 、 $106^{\circ}07'E \sim 107^{\circ}17'E$ 。苗岭横延贵阳市境内,剥蚀丘陵与盆地、谷地、洼地相间,具有典型的亚热带湿润气候,地势西南高东北低,海拔差大,坡度差达 75° ,山地城市形态明显,地形起伏较大,沟壑密布,且空间分布不均匀,在短时暴雨影响下,极易形成洪涝灾害(图1)。花溪区、云岩区和南明区作为贵阳市的主要城区,具有复杂的地形和多变的气候条件,这些因素对城市内涝的形成和发展有重要影响。2023年6月18日,贵阳市遭遇了罕见的大暴雨,导致包括花溪区、云岩区和南明区在内的多个区域出现了严重的洪涝灾害。暴雨导致城区地势低洼区域积水,其中部分地铁站、居民区、停车场、道路区域积水严重,个别地区积水可达成人颈部,严重威胁了市民的生命财产安全。贵阳市的排水系统在面对极端降雨事件时显示出了明显的脆弱

性。城市内涝点的空间分布特征表明,内涝具有集聚效应,集聚中心位于云岩区和南明区,内涝分布方向经历了由“南—北”向“东南—西北”的转变。因此,选择花溪区、云岩区和南明区作为贵阳市内涝研究的重点区域。

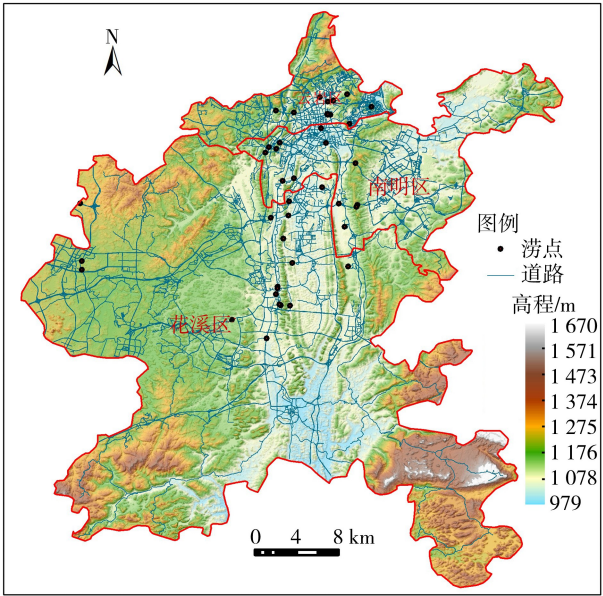


图1 贵阳市地形与历史涝点分布

Fig.1 Topography of Guiyang City and distribution of historical waterlogging points

2 模型构建

2.1 数据基础

地形数据为12.5 m分辨率的栅格数据,是径流模拟的基础;土地覆盖数据为1 m分辨率的栅格数据,在研究过程中重采样为12.5 m分辨率,用于反映不同下垫面特征;道路数据为1:10000比例尺的矢量数据,需转换为12.5 m栅格数据,用于模型排水口生成。

2.2 径流模拟模型构建

分布式模型一般以流域为单位进行水文过程模拟,仅能获取流域出口的相关水文模拟参数^[34]。针对贵阳市复杂的地形环境,采用全分布式径流模型构建城市内涝的基础径流模型。空间上将城市划分为大量尺寸相同的栅格,时间上将内涝模拟时段划分为相等的时间片;在此基础上,以高分辨率地形数据、土地覆盖数据等为基础,在12.5 m分辨率下完成每一个时间片上的像元级水量迁移和水动力计算。

a. 栅格的水量平衡方程。以每一个栅格逐个作为中心栅格,设为 c ,相邻两个时间片分别为 t_k 、 t_{k+1} ,则栅格 c 在时间片上的水量平衡公式为

$$H_{c,k+1} = H_{c,k} + P_{c,k} + Q_{in,c,k} - F_{c,k} - E_{c,k} - Q_{out,c,k} - D_{c,k} \quad (1)$$

式中: $H_{c,k+1}$ 为 t_{k+1} 时间片的中心栅格水深; $H_{c,k}$ 、 $P_{c,k}$ 、 $F_{c,k}$ 、 $E_{c,k}$ 、 $Q_{in,c,k}$ 、 $Q_{out,c,k}$ 、 $D_{c,k}$ 分别为中心栅格 t_k 时间片上的初始水深、降水量、下渗量、蒸发量、流入量、流出量、排水量。其中,降水量、下渗量、蒸发量和排水量为栅格单元垂直方向上的水量收支。参考李毅等^[35-36]的研究,结合贵阳市内涝主要发生在夏季,按土地覆盖类型确定不同下垫面的下渗与蒸发参数。林地稳定下渗率为 6 mm/h,蒸发率为 0.18 mm/h;草地与耕地下渗率均为 5 mm/h,蒸发率均为 0.12 mm/h;建筑下垫面下渗率为 1.1 mm/h,蒸发率为 0.05 mm/h;道路下渗率为 0,蒸发率为 0.05 mm/h;裸地下渗率为 3 mm/h,蒸发率为 0.04 mm/h;水体下渗率为 0,蒸发率为 0.22 mm/h。

b. 像元级水量迁移计算。流入量和流出量为栅格单元在水平方向上的水量收支,通过水量迁移计算实现。设邻域栅格 b 的水流速度矢量为 $(v_{b,x}, v_{b,y})$,邻域栅格有水流入中心栅格,同时中心栅格也有水向外流出,水量迁移后中心栅格水深的计算公式为

$$H_{c,k+1} = \left(\sum_{b=1}^8 H_{b,k} S_{b \rightarrow c,k} \right) + H_{c,k} S_{c,k} \quad (2)$$

其中 $S_{b \rightarrow c} = \max(1 - |\Delta x + v_{b,x}/v_{\max}|, 0) \cdot \max(1 - |\Delta y + v_{b,y}/v_{\max}|, 0)$

$S_c = \max(1 - |v_{b,x}/v_{\max}|, 0) \max(1 - |v_{b,y}/v_{\max}|, 0)$

式中: $S_{b \rightarrow c}$ 为邻域栅格 b 流入到中心栅格 c 的水量比例; S_c 为中心栅格 c 的剩余水量比例; $(\Delta x, \Delta y)$ 为邻域栅格坐标相对中心栅格坐标的偏移; $v_{\max}$ 为时间片上允许的最大速度标量。当栅格水速等于 $v_{\max}$ 时,径流在水平方向上全部流出,因此 $v_{\max}$ 决定了两个时间片间隔的大小,即 $\Delta t = C/v_{\max}$, C 为栅格像元分辨率。

c. 像元级水动力计算。在径流汇流模拟中,利用水动力模拟为栅格水流设定加速度。时间片上邻域栅格对中心栅格产生的速度矢量增量 $(\Delta v_{b,x}, \Delta v_{b,y})$ 的表达式为

$$\begin{cases} \Delta v_{b,x} = \sum_{b=1}^8 (-\alpha \Delta x \Delta H_b) \\ \Delta v_{b,y} = \sum_{b=1}^8 (-\alpha \Delta y \Delta H_b) \end{cases} \quad (3)$$

式中: α 为与水体密度、重力加速度、摩擦力等相关的正数常量; ΔH_b 为相邻栅格相对于中心栅格的水位高度差。水位高度为地形高度与栅格水深之和。

d. 模拟过程。因研究区缺少地下管网数据,设沿道路排水口间隔为 d ,采用等间距法生成研究区内所有道路的模拟排水口,如图 2 所示。显然, d 越小,总的排水口数量越多,如 $d=30$ m,研究区内的总

模拟排水口数量为 113 181。



图 2 模拟排水口

Fig. 2 Simulated drainage outlets

考虑水量平衡,对于排水口所在栅格,如果栅格水深小于时间片上的理论水深,则实际排水量为当前栅格的水量;如果栅格水深大于时间片上的理论水深,则时间片上因排水减少的最大水深 $H_{p,\max}$ 为

$$H_{p,\max} = 3600q / (\Delta t C^2) \quad (4)$$

式中 q 为排水口流量。

2.3 城市内涝模型构建

在径流模拟的基础上构建城市内涝模型,步骤为:①通过极端内涝个例分析不同排水间隔下排水口的排水能力,结合贵阳市实际情况,确定模拟时的排水口间隔以及不同排水口对应的最大排水能力;②将排水口流量按照一定间隔递增至最大排水流量,通过径流模拟模型获取每一个涝点不同排水流量下的淹没水深;③将涝点的无排水淹没区参数、局部地形参数、排水口流量与淹没水深相组合,构建历史涝点数据库;④以历史涝点数据库为训练数据,利用随机森林算法构建排水能力与水深双向预测模型;⑤利用时间相近的历史降雨过程进行无排水径流模拟,获取无排水淹没参数,代入排水流量预测模型,结合内涝灾情进行排水能力估算;⑥针对未来降雨过程,将无排水淹没参数代入到水深预测模型,根据涝点最近时间的排水能力预测下一次降水过程的城市内涝水深。城市内涝模拟技术路线如图 3 所示。

城市内涝模型建立过程中的关键节点包括:

a. 排水口间隔与最大排水能力确定。降水量过大、排水能力不足是导致城市内涝的主要原因。当排水口均按照最大排水流量进行排水时,城市的整体排水能力达到最大化;如果降水量未超过城市的最大排水能力,则城市中无内涝发生。根据该思路确定城市最大排水能力,基于历史极端内涝数据运行径流模拟模型,假定非内涝区域的排水口排水通畅,且存在一定数量排水口的排水量达到或接近最大排水能力。将模拟排水口的流量从 0 逐渐增加,获取不同排水量条件下的道路积水深度。如果

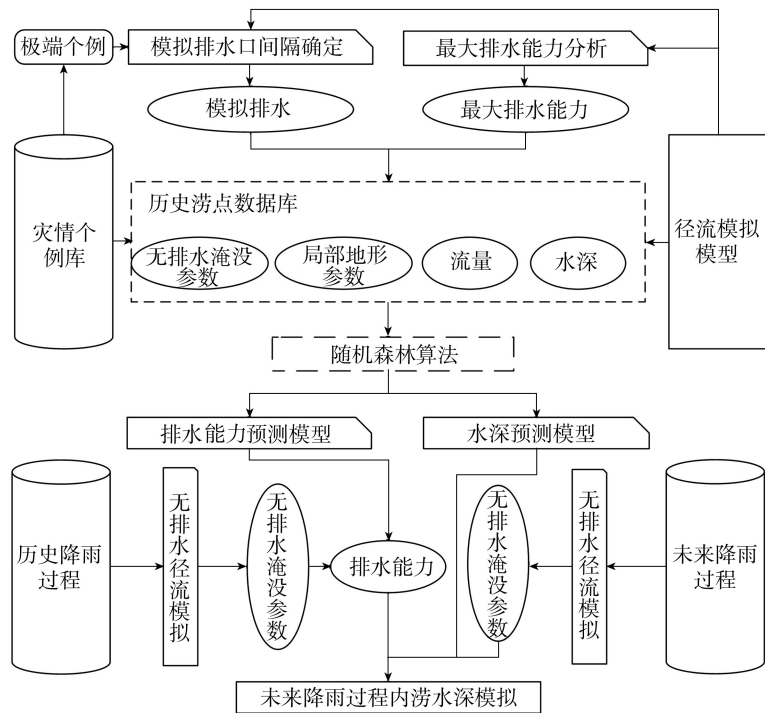


图3 城市内涝模拟技术路线

Fig. 3 Technical route of urban waterlogging simulation

排水口流量达到最大 $q_{\max}$ 时,98%的非涝点排水口模拟时段内的最大模拟水深均小于 5 cm,则此时的 $q_{\max}$ 为城市的最大排水能力。设置不同的排水口间隔,按上述方法分别获取不同排水间隔下的 $q_{\max}$,将模型模拟结果与实际情况进行对比,确定模拟排水口的间隔以及对应的最大排水能力。

b. 模拟时间范围的确定。城市内涝的水位峰值出现时间受降雨峰值时序、排水系统响应、地表汇流速度等多因素影响。研究表明,不同降水类型下内涝峰值出现时间存在明显差异,短时特大暴雨因降雨峰值超前、管网瞬时超载,峰值出现在降雨开始后 0.5~2 h;单峰型暴雨因水位峰值滞后降雨峰值约 0.5~1 h(地表蓄满需时),峰值出现在降雨开始后 1~3 h;双峰或持续暴雨因第二降雨峰值期叠加前期积水(地下水抬升与管网疲劳),峰值出现在降雨开始后 3~6 h;台风叠加天文潮情形下,潮位顶托导致排水能力下降约 80%,显著加速峰值出现,峰值出现在降雨开始后 0.5~1.5 h;而长历时中雨因土壤下渗能力逐渐饱和(下渗率从大于 10 mm/h 降至小于 2 mm/h),峰值出现较晚,一般为降雨开始后 4~6 h^[37-39]。可见,不同降水类型所引发的城市内涝水位峰值均出现在降雨开始后 0.5~6 h 范围内,因此本文将一次降水过程中最大降水量发生时间的前后 3 h 设定为模拟时间范围。

c. 排水能力与水深双向预测。构建排水能力与水深的双向预测模型是城市内涝模型的核心。通

过水深预测排水能力可利用灾情个例确定排水口当前的排水能力;通过排水能力预测水深可在城市排水能力变化不大时,相对精确地根据预报降水量预测城市的内涝状态。采用随机森林算法构建排水能力与水深双向预测模型,将历史灾情个例最大降水量发生时间的前后 3 h 降水数据输入径流模拟模型,按照一定的间距将排水流量从 0 递增至 $q_{\max}$,模拟出不同排水流量下涝点在模拟时段内的最大水深,生成随机森林训练数据集;对于训练集中的每一个样本 j ,定义为排水口流量、与排水口流量对应的涝点最大水深、沿道路 100 m 范围内高于平均高程的面积比例(与内涝过程无关的静态变量)及无排水状态下样本所在淹没区像元个数、排水口数量、平均淹没水深的集合。检查当前降水过程模拟得到时段最大淹没水深,如果水深大于 0.05 m,则定义为涝点;以涝点为起点,所有空间上相邻的道路区域构成一个淹没区,图 4 为涝点及淹没区示意图。将各涝点利用不同降水过程进行模拟,构建训练样本。将区域中所有灾情个例在不同排水流量下模拟得到的涝点样本组合成一个训练数据集。将水深作为预测项,其余为输入项,代入随机森林模型进行训练,即可得到从水深到排水能力的预测模型;同样地,将流量作为预测项,其余为输入项,即可得到从排水能力到水深的预测模型。

d. 基于双向预测模型的内涝水深预测。对于每一个涝点,将历史内涝过程实际水深数据代入排

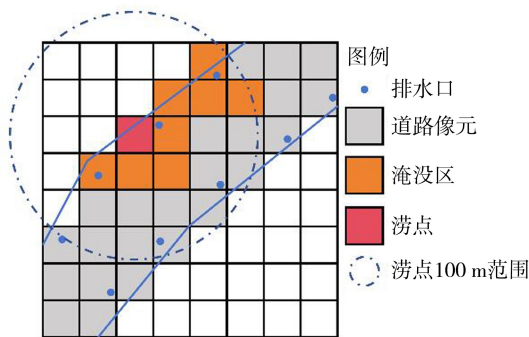


图4 涝点及淹没区示意图

Fig. 4 Diagram of flooding point and submerged area

水能力预测模型,获取对应的排水口流量,作为涝点的基础排水能力。进而针对未来的降水过程,首先假定所有排水口均无排水,利用降水数据进行径流过程模拟,得到每一个涝点无排水状态下所在淹没区的像元个数、排水口数量、平均淹没水深;其次,将最近时间的该涝点处流量数据输入水深预测模型,得到预测水深。在实际情况下,涝点的排水能力不断变化,为了提高内涝预测精度,在每一次降水过程后,需要再次利用流量预测模型对涝点的排水能力进行更新。

3 模拟试验

3.1 最大排水能力分析

2023年6月18日晚,贵阳市遭遇强降雨天气。国家级气象站贵阳站6月18日累计日降水量为130.8 mm,达到大暴雨量级。据监测,降水发生在18日14时至19日8时,在19日0时降水量达到最大,贵阳站小时降水量最大为99.8 mm,此次降水过程导致云岩区、南明区、花溪区等30处道路发生较为严重积水。本文选择此次内涝灾情作为历史极端个例。

设置7组排水口间隔(20、25、30、35、40、45、50 m)并逐组率定最大排水能力。将18日21点至19日3点降水数据代入径流模拟模型,分别设置排水口流量为0~0.6 m³/s,模拟时段内每一个排水口位置上的淹没水深,并统计排水口淹没(淹没水深大于0.05 m)比例,结果如图5所示。在20、25、30、35、40、45、50 m排水口间隔条件下,对应的最大排水能力分别为0.105、0.143、0.170、0.195、0.239、0.273、0.297 m³/s。

由图5可见,在确定的排水口间隔情况下,随着排水流量的增加,排水口淹没比例逐渐降低。不同间隔条件下均可找到对应的最大排水能力。这表明排水口间隔与最大排水能力存在参数等效性,即较小间隔搭配较低排水能力,较大间隔搭配较高排水

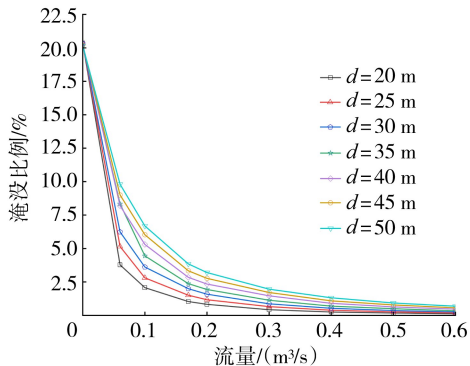


图5 不同排水口间隔条件下排水口淹没比例

Fig. 5 Submerged ratio of drainage outlets under different spacing conditions

能力。也就是说,模型模拟过程中,不同的排水间隔均可通过设定相应的排水能力使得98%的非涝点保持排水口不被淹没。GB50014—2006《室外排水设计规范》规定雨水口间距宜为25~50 m,贵阳市市政管理的经验总结的排水设施间隔大约为20~30 m,为使模型模拟与实际情况更为贴合,本文将排水口间隔设定为30 m,对应的最大排水流量为0.17 m³/s。

3.2 排水能力与水深双向预测

采集2023—2024年10次内涝过程数据,将最大降水量前后3 h降水数据带入径流模拟模型,排水口流量以0.003 m³/s为间隔从0递增至0.17 m³/s,模拟出每个内涝过程各涝点逐小时淹没水深,组成训练数据库。数据库共计919条记录,以此数据作为驱动,训练随机森林模型。以无排水淹没区参数、局部地形参数、水深为自变量,流量为因变量,预测排水能力;同样地,以无排水淹没区参数、局部地形参数、流量为自变量,预测水深。

为评价模型精度,将数据库中80%作为训练样本,余下的20%作为测试样本。采用绝对误差评价排水能力预测结果,绝对误差小于0.01 m³/s认为预测正确,统计其预测精度;采用相对误差评价水深预测结果,相对误差小于20%认为预测正确。测试样本中,排水能力预测准确率达到93.68%,水深预测准确率为86.95%,可见模型模拟精度较高,能够应用于城市内涝模拟。

3.3 城市内涝模拟结果与精度评价

以2023年6月18日历史极端个例,模拟2024年6月29日贵阳市内涝过程,并与实际观测水深进行对比。由于实际采集涝点是人工上报的,很难保证在不同的灾情个例中涝点位置完全相同。因此,对照2024年6月29日的实际涝点,选择2023年6月18日与2024年4月18日两次内涝过程的16个涝点,空间分布如图6所示。利用参照时

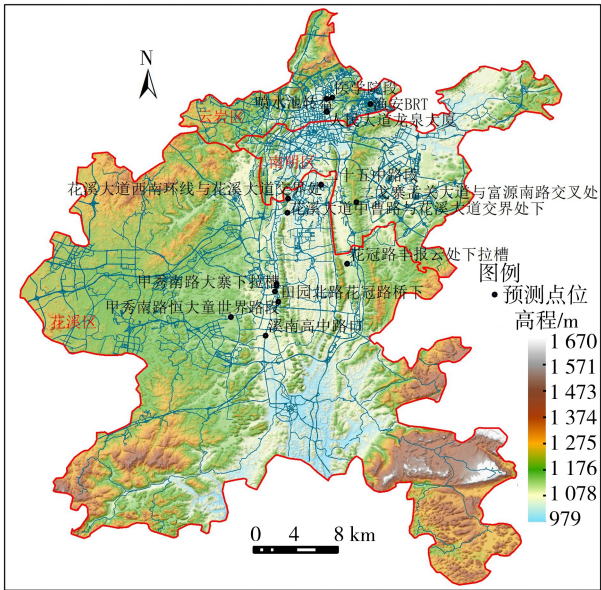


图 6 涝点空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of waterlogging points

间的实际观测淹没水深,反演出涝点附近的排水口流量,从而预测 2024 年 6 月 29 日对应位置水深,结果如表 1 所示,表中√表示预测正确。

表 1 贵阳市 2024 年 6 月 29 日内涝模拟结果

Table 1 Simulation results of urban flooding in Guiyang City on June 29, 2024							
涝点	参照时间	参照水深/m	反演流量/(m ³ /s)	预测水深/m	实际水深/m	实际状态	预测结果
甲秀南路吉林路下拉槽	20240418	0.10	0.064 3	0.021	0	无内涝	√
甲秀南路大寨下拉槽	20240418	0.50	0.081 9	0.050	0	无内涝	√
甲秀南路恒大童世界路段	20240418	0.35	0.003 3	0.206	0	无内涝	
甲秀南路清华中学路段	20240418	0.30	0.005 7	0.120	0	无内涝	
田园北路花冠路桥下	20240418	0.25	0.048 3	0.046	0	无内涝	√
溪南高中路口	20240418	0.10	0.161 0	0.035	0	无内涝	√
二戈寨孟关大道与富源南路交叉处	20240418	0.20	0.038 8	0.050	0	无内涝	√
花冠路丰报云处下拉槽	20240418	0.15	0.151 3	0.050	0	无内涝	√
花溪大道中曹路与花溪大道交叉处下拉槽	20240418	0.15	0.010 8	0.042	0	无内涝	√
二十五中路段	20240418	0.05	0.008 9	0.097	0	无内涝	
花溪大道西南环线与花溪大道交叉处下拉槽	20240418	0.15	0.052 7	0.048	0	无内涝	√
医学院段	20240418	0.25	0.016 6	0.050	0	无内涝	√
渔安公交枢纽站	20240418	0.15	0.048 5	0.046	0	无内涝	√
人民大道龙泉大厦	20240418	0.25	0.004 1	0.084	0.070	内涝	√
喷水池转盘	20240418	0.25	0.031 7	0.070	0.060	内涝	√
北京路交界处下拉槽	20230618	1.20	0.001 6	0.213	0.067	内涝	

4 结 语

为解决贵阳市排水管网数据缺失导致内涝模型模拟精度不足的问题,提出了一种基于排水能力与水深双向预测的复杂地形城市内涝模型。该模型沿道路以 30 m 为间隔生成等间距排水口,基于全分布式径流模拟进行排水能力分析,通过随机森林算法预测排水能力和水深。利用该模型模拟贵阳市 2024 年 6 月 29 日的内涝过程,结果表明预测准确率为 75%,预测精度较高。该模型无需实际动态管网数据,对数据要求较低,可应用于管网数据欠缺的

如果预测水深小于 0.05 m 且 2024 年 6 月 29 日点位上未观测到内涝,则认为预测正确;如果预测水深大于 0.05 m 且与 2024 年 6 月 29 日的观测水位的相对误差小于 20%,也认为预测正确。由表 1 可见,共有 12 个点位的内涝状态被正确预测,预测精度为 75%。13 个历史涝点未在 2024 年 6 月 29 日观测到内涝,模型模拟到其中 10 个水深不超过 0.05 m,预测正确;人民大道龙泉大厦和喷水池转盘两处预测水深的相对误差不超过 20%,预测正确;北京路交界处下拉槽的水深绝对误差达到了 0.146 m,相对误差为 217.9%,该点在 2023 年 6 月 18 日内涝过程的水深为 1.2 m,是一处极端积水,模型模拟的误差也较大。模拟结果得到人民大道龙泉大厦、喷水池转盘、北京路交界处下拉槽 3 处涝点,这些位置附近 100 m 范围存在经常发生灾情的历史涝点;其余 13 处历史涝点在本次模拟中均显示无内涝。可见,内涝的发生除降水、排水的因素外,还有其他影响因素,导致模型模拟结果与真实情况发生一定偏差。

城市,为复杂地形城市内涝积水预测提供了新的思路。

参考文献:

[1] 赵超辉, 王金红, 张云霞, 等. 城市内涝特征、成因及应对研究综述[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 220-228. (ZHAO Chao-hui, WAN Jinhong, ZHANG Yunxia, et al. Review of the characteristics, causes and governance of urban flood in China[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 220-228. (in Chinese))

[2] 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. (CHENG Xiaotao, LIU Changjun, LI Changzhi, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 757-768. (in Chinese))
- [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. (in Chinese))
- [4] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))
- [5] ZHENG Zheng, GAO Junqi, MA Zhen, et al. Urban flooding in China: main causes and policy recommendations [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(7): 1149-1152.
- [6] 李鹏,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型的城市暴雨内涝模拟:以济南市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1083-1092. (LI Peng, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Simulation of urban rainstorm waterlogging processes based on SWMM and LISFLOOD-FP models: case study in Jinan City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1083-1092. (in Chinese))
- [7] 王兆礼,陈昱宏,赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 117-124. (WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124. (in Chinese))
- [8] 王颖,王强国. 基于 GIS 技术的海绵城市内涝灾害数值可视化研究[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 70-74. (WANG Ying, WANG Qiangguo. Study on numerical visualization of waterlogging disaster in sponge city based on GIS technology [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(2): 70-74. (in Chinese))
- [9] 张金萍,张朝阳,左其亭. 极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(2): 30-37. (ZHANG Jinping, ZHANG Zhaoyang, ZUO Qiting. Urban waterlogging simulation and emergency response capacity evaluation with extreme rainstorms [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(2): 30-37. (in Chinese))
- [10] 黄国如,王欣,黄维. 基于 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝模拟[J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 66-70. (HUANG Guoru, WANG Xin, HUANG Wei. Simulation of rainstorm water logging in urban area based on InfoWorks ICM model [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(2): 66-70. (in Chinese))
- [11] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 41-47. (HOU Jun, CHEN Cheng, ZHENG Yulei, et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 41-47. (in Chinese))
- [12] 栾震宇,金秋,赵思远,等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 81-88. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 81-88. (in Chinese))
- [13] THRYSSØE C, BALSTRØM T, BORUP M, et al. FloodStroom: a fast dynamic GIS-based urban flood and damage model [J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126521.
- [14] 刘媛媛,刘业森,郑敬伟,等. BP 神经网络和数值模型相结合的城市内涝预测方法研究[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 284-295. (LIU Yuanyuan, LIU Yesen, ZHENG Jingwei, et al. Intelligent rapid prediction method of urban flooding based on BP neural network and numerical simulation model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 284-295. (in Chinese))
- [15] 黄曦涛. 城市内涝脆弱度评价与灾害影响模型研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
- [16] 王若楠. 城市内涝风险等级评估方法及案例研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2016.
- [17] 邓成,夏军,余敦先,等. 基于水文水动力耦合模型的深圳市典型区域城市内涝模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(8): 912-921. (DENG Cheng, XIA Jun, SHE Dunxian, et al. Urban waterlogging simulation in a typical area in Shenzhen based on hydrological-hydrodynamic coupling model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(8): 912-921. (in Chinese))
- [18] 潘鑫鑫,侯精明,陈光照,等. 基于 K 近邻和水动力模型的城市内涝快速预报[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 91-100. (PAN Xinxin, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Rapid forecasting of urban waterlogging based on K-nearest neighbor and hydrodynamic model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 91-100. (in Chinese))
- [19] 王心舒,江思珉,郑茂辉,等. 城市高密度区域排水系统优化方案模拟评价[J/OL]. 河海大学学报(自然科学

- 版): 1-10 (2025-03-18). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20250318.1207.002>. (WANG Xinshu,JIANG Simin,ZHENG Maohui, et al. Simulation evaluation of drainage optimization schemes in high-density urban areas[J/OL]. Journal of Hohai University (Natural Sciences); 1-10 (2025-03-18). <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250318.1207.002>. (in Chinese))
- [20] 向小华,陈颖悟,吴晓玲,等.城市二维内涝模型的GPU并行方法[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):528-533. (XIANG Xiaohua, CHEN Yingwu, WU Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(6):528-533. (in Chinese))
- [21] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等.基于SWMM与LISFLOOD-FP耦合模型的城市街区内涝模拟研究[J].水资源保护,2024,40(3):98-105. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Research on urban block waterlogging simulation based on coupling model of SWMM and LISFLOOD-FP [J]. Water Resources Protection,2024,40(3):98-105. (in Chinese))
- [22] 林凯荣,欧阳佳娜,马旭民,等.基于深度学习的城市内涝积水水深预测模型[J].水资源保护,2025,41(1):56-63. (LIN Kairong, OUYANG Jia'na, MA Xumin, et al. Prediction model of urban waterlogging water depth based on deep learning[J]. Water Resources Protection,2025,41(1):56-63. (in Chinese))
- [23] KRATT C B, WOO D K, JOHNSON K N , et al. Field trials to detect drainage pipe networks using thermal and RGB data from unmanned aircraft[J]. Agricultural Water Management,2020,229:105895.
- [24] 徐慧珺.基于SWMM模型的南京典型区雨洪模拟研究[D].南京:南京师范大学,2017.
- [25] 臧文斌.城市洪涝精细化模拟体系研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2019.
- [26] WANG Yuntao, CHEN A S, FU Guangtao, et al. An integrated framework for high-resolution urban flood modelling considering multiple information sources and urban features[J]. Environmental Modelling & Software, 2018,107:85-95.
- [27] 杨东,侯精明,李丙尧,等.无资料城区管网排水过程概化模拟研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(3):139-144. (YANG Dong, HOU Jingming, LI Bingyao, et al. Generalized simulation of drainage process in urban networks without data[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2020,31(3):139-144. (in Chinese))
- [28] 李东来.精细地形及管网资料缺失城区雨洪过程数值模拟方法研究[D].西安:西安理工大学,2020.
- [29] 杜佳锴,徐梦华,陈昱宏,等.无管网资料地区城市雨洪过程模拟研究[J].水力发电学报,2023,42(2):87-96. (DU Jiakai, XU Menghua, CHEN Yuhong, et al. Study on urban stormwater process simulations for areas with no sewer network data [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2023,42(2):87-96. (in Chinese))
- [30] 都利亚.管网资料缺失城区内涝数值模拟及风险评估研究[D].广州:华南理工大学,2023.
- [31] 侯精明,王润,李国栋,等.基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J].水力发电学报,2018,37(3):40-49. (HOU Jingming, WANG Run, LI Guodong, et al. High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2018,37(3):40-49. (in Chinese))
- [32] 王润.高分辨率城市内涝过程数值模拟研究:以西咸新区海绵城市试点区域为例[D].西安:西安理工大学,2018.
- [33] LIANG Qihua, SMITH L, XIA Xilin. New prospects for computational hydraulics by leveraging high-performance heterogeneous computing techniques [J]. Journal of Hydrodynamics,2016,28(6):977-985.
- [34] 陈军,刘意,李婷.一种基于稳定流场的流域径流汇流模拟方法[J].中国农村水利水电,2020(4):76-81. (CHEN Jun, LIU Yi, LI Ting. A basin runoff simulation modal based on steady flow fields[J]. China Rural Water and Hydropower,2020(4):76-81. (in Chinese))
- [35] 李毅,王全九,邵明安,等.Green-Ampt入渗模型及其应用[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(2):225-230. (LI Yi, WANG Quanjiu, SHAO Mingan, et al. Green-Ampt model and its application[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2007,35(2):225-230. (in Chinese))
- [36] 李贵玉.黄土丘陵区不同土地利用类型下土壤入渗性能对比研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2007.
- [37] 国务院灾害调查组.河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R].北京:国务院灾害调查组,2022.
- [38] 梁鑫,侯精明,陈光照等.考虑降雨空间分布的城市内涝对模式雨型响应特征分析[J].水利水运工程学报,2024,2024(2):44-54. (LIANG Xin, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Investigation of the response characteristics of urban waterlogging to model rainfall patterns taking into account the spatial distribution of rainfall[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(2):44-54. (in Chinese))
- [39] 赖成光,廖耀星,王兆礼.不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J].水资源保护,2023,39(3):101-108. (LAI Chengguang, LIAO Yaoping, WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 101-108. (in Chinese)).

(收稿日期:2025-04-27 编辑:王芳)