

空间不均匀降雨及管道淤积对城市内涝的影响研究

张金萍^{1,2}, 王茹玉¹, 张立新³, 李学淳¹, 李志伟¹

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 黄河生态保护与区域协调发展研究院, 河南 郑州 450001; 3. 北方民族大学, 宁夏 银川 750030)

摘要:【目的】揭示降雨空间不均匀性与管道淤积的耦合作用对城市内涝的影响机制,为城市排水系统优化设计及内涝风险精准防控提供科学依据。【方法】以郑州市中心城区某片区为研究对象,构建反映实际降雨特征的空间不均匀性降雨模型,利用 InfoWorks ICM 软件模拟不同暴雨中心位置、不均匀系数及管道淤积程度下的城市内涝响应过程。【结果】①不同暴雨中心的内涝程度存在差异,内涝严重程度排序为 D(红专路卫生路)>A(金水路未来路)>B(文化路东凤路)>C(文化北路连霍高速)。该差异主要受各暴雨中心周边的管网排水能力、下垫面类型以及地形条件的影响。②随着降雨不均匀系数增大,降雨强度在暴雨中心更加集中,积水深度与积水面积显著增加,内涝空间分布呈现向中心聚拢的特征。③在不利降雨情景下,管道淤积程度对内涝风险存在明显阈值效应。当淤积系数超过 0.3 时,严重淤积管道(Ⅲ级)占比急剧上升,积水面积大幅增加。【结论】降雨空间不均匀性显著增加了局部区域的涝灾风险,管道淤积达到一定程度后会引发排水系统的连锁失效,二者的耦合作用进一步加剧了城市内涝程度。建议在城市排水系统规划与改造中,重点关注暴雨中心易发区的管网提标与清淤维护,以提升系统整体韧性。

关键词:空间不均匀降雨;空间不均匀系数;二维截断高斯分布;管道淤积

中图分类号:TU992

文献标识码:A

文章编号:2096-6792(2026)04-0039-10

近年来,我国城市暴雨事件发生频率和强度均呈上升趋势,导致内涝问题日益突出,给社会经济和公共安全带来严重挑战^[1]。《2021 中国水旱灾害防御公报》显示,全国 30 省(自治区、直辖市)均发生不同程度洪涝灾害,因洪涝共有 5 901.01 万人次受灾、590 人死亡失踪、15.20 万间房屋倒塌,直接经济损失 2 458.92 亿元。其中,发生于河南的“7·20”特大暴雨损失更加惨重,造成 398 人死亡、失踪,直接经济损失 1 200.6 亿元。

一方面,降雨是导致城市内涝灾害发生的根源。传统的城市暴雨内涝模拟多采用设计降雨过程线,该方法未能充分考虑降雨的空间分布不均匀性,忽略了不同地区降雨强度的显著差异^[2-3]。针对这一问题,有学者使用高斯型降雨作为空间降雨结构模型的基础,并分析该降雨模型作为降雨输入数据对水文模型结果的影响^[4-5];也有学者基于实测降雨数据获取了暴雨单体空间参数、运动参数以及其概率分布、暴雨持续时间和统计模型等,在这

些基础上构建了一个空间降雨生成器;还有学者采用假定降雨强度空间分布的方式提出“Random”“Distance”“Distance-Reverse”3 种考虑空间不均匀降雨的合成降雨模型^[6]。

另一方面,城市排水管网是有效减轻暴雨内涝灾害的关键基础设施,在维持城市正常运行中起到重要作用^[7]。然而,城市排水管网系统由于长时间运行以及受外部因素的影响,常常积累大量沉积物,导致管道有效过水断面减小、水流受阻,排水效率降低^[8]。目前,相关研究主要包括以下两个方面:一是对管道内泥沙输送特性以及管道沉积物特性的研究;二是管道淤积对城市内涝影响的研究,但大多集中于管道排水能力和节点溢流等一维特性方面^[9-11]。

降雨和管道淤积作为城市内涝的两个关键因素,相互交织、共同作用,不仅诱发城市内涝,也加剧了内涝的严重程度。因此,必须将二者联系起来。既要分析降雨空间不均匀性对城市内涝特征

收稿日期/Received:2025-01-02

修回日期/Revised:2025-04-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52379028);河南省自然科学基金项目(242300421007)。

第一作者:张金萍(1979—),女,教授,博导,博士,从事城市雨洪和区域水资源开发方面的研究。E-mail:jinpings2000zh@163.com。

的影响,更要阐明在降雨空间不均匀性与管道淤积共同作用下,城市暴雨内涝过程的演化规律。然而,现有研究成果往往将降雨空间不均匀性的影响与管道淤积的影响分开探讨,割裂了二者之间的内在联系。

因此,本研究通过构建空间不均匀降雨模型,并结合 InfoWorks ICM 模型^[12-13],模拟不同降雨情景及“不均匀降雨-管道淤积”复合情景下的城市内涝过程。通过对研究区的内涝特征分析,厘清空间不均匀降雨和管道淤积对城市内涝特征的影响,旨在为城市内涝防治提供科学依据,为科学调度决策提供支撑,从而有效减轻内涝灾害损失。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

郑州市位于华北平原南部,河南省中部偏北,总面积 7 567 km²。该市属于北温带大陆性季风气候,夏季炎热,冬季寒冷,年平均降雨量为 640.9 mm,主要集中在 7—9 月。本研究选取了中心城区的某片区作为研究对象,总面积 74.44 km²,如图 1 所示。研究区城镇化水平较高,人口高度集中,经济高度集聚。一旦发生内涝灾害,将造成严重的人员伤亡和经济损失。研究区排水管道老旧,泥沙容易淤积,当遭遇暴雨内涝灾害时,积水严重的路段将影响交通正常运行。

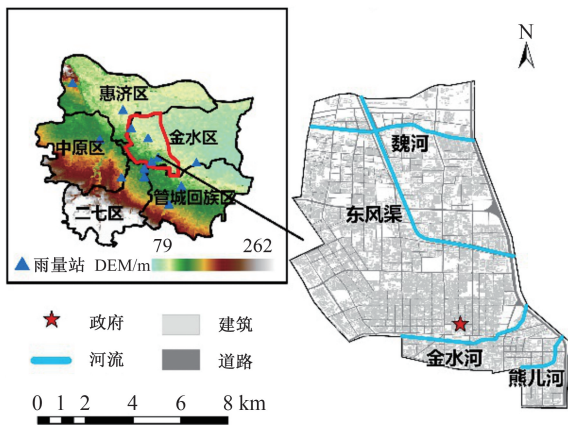


图 1 研究区区位图

Fig. 1 Location map of study area

1.2 数据来源

降雨数据来源于郑州市 12 个雨量站的 52 场 3 h 短历时降雨资料。排水管网数据来源于郑州市排水工程规划文本图册。数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)、土地利用、植被、土壤、水体等资料均来源于中科图新官网。

2 研究方法

2.1 空间不均匀降雨模型

为了模拟降雨的空间不均匀性,本研究采用合成降雨模型^[14]。该模型通过调整暴雨中心附近和远处的降雨强度,使其分别按比例增长、降低,同时保持区域总降雨量不变。

1) 降雨空间不均匀性指标的定义。假设研究区共有 n 个雨量站,首先,根据各站点位置和同时段降雨量,结合地理信息系统 (Geographic Information System, GIS),采用克里金插值法得到区域平均降雨量和最大降雨量。然后,将区域平均降雨量视为空间不均匀降雨的平均降雨量 $\bar{P}$,最大降雨量视为空间不均匀降雨的暴雨中心雨量 $P_{\max}$,通过 $P_{\max}$ 与 $\bar{P}$ 的比值反映降雨空间分布的不均匀程度,计算式如下:

$$\alpha = \frac{P_{\max}}{\bar{P}} \quad (1)$$

式中: α 为降雨不均匀系数, α 越大,表明降雨的空间分布越不均匀; $\bar{P}$ 为区域平均降雨量,mm; $P_{\max}$ 为区域最大降雨量,mm。

2) 二维截断高斯分布。二维高斯分布的数学特性与降雨空间分布的典型特征高度契合,其模型控制方程如下:

$$\iint_D \beta f(x, y, \sigma) dx dy = r(t) A, \quad (2)$$

$$R(x, y, \mu_1, \mu_2, \sigma, t) = \beta f(x, y, \mu_1, \mu_2, \sigma) r(t), \quad (3)$$

$$f(x, y, \mu_1, \mu_2, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-\mu_1)^2 + (y-\mu_2)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (4)$$

式中: $r(t)$ 为设计降雨过程线,mm/h; t 为时间,h; A 为区域面积,m²; D 为二维截断高斯分布的定义域,即研究区的空间范围; β 为截断高斯分布的缩放系数,用于保证高斯分布在定义域 D 上的积分等于 1,即 $\iint_D \beta f(x, y, \sigma) dx dy = \iint_D dx dy$; μ_1, μ_2, σ 分别为二维截断高斯分布的均值与标准差; (μ_1, μ_2) 为空间不均匀降雨的暴雨中心位置。

经过推导,上述控制方程可以简化为:

$$\iint_D f(x, y, \sigma) dx dy = \frac{A}{2\pi\sigma^2\alpha}. \quad (5)$$

采用 ICM 分布式水文模型模拟地表水文过程,该模型以子汇水区为最小计算单元,因此公式

(5)需要进行离散化。设研究区共有 n 个子汇水区,第 i 个子汇水区的中心坐标为 (x_i, y_i) ,面积为 a_i ,则有:

$$\sum_{i=1}^n a_i f(x_i, y_i, \mu_1, \mu_2, \sigma) = \frac{A}{2\pi\sigma^2\alpha} \quad (6)$$

当不均匀系数 α 已知时,通过 MATLAB 求解含有未知数 σ 的隐式方程。当 σ 的值确定后,得到相应的空间不均匀降雨强度公式:

$$R(x, y, \mu_1, \mu_2, \sigma, t) = 2\pi\sigma^2\alpha f(x_i, y_i, \sigma) r(t) \quad (7)$$

2.2 城市暴雨内涝模型构建

采用 Infoworks ICM 构建暴雨内涝模型。首先,对研究区管网进行概化处理,概化后共有 335 个节点、331 根管道和 6 个出水口。然后,采用泰森多边形法将研究区划分为 240 个子汇水区。最后,利用高程数据建立地面模型,并完成网格划分。在模型率定阶段,选取 2017 年 8 月 12 日和 2022 年 9 月 13 日两场降雨作为率定期^[15],计算得到的综合径流系数分别为 0.654 和 0.630。这两个数值与《郑州市排水工程规划(2011—2020 年)》中确定的综合径流系数 0.65 较为接近。选取 2018 年 8 月 1 日和 2021 年 8 月 14 日两场降雨作为验证期,计算得到的综合径流系数分别为 0.680 和 0.678,同时模拟出的积涝点位置与实测积水点基本吻合。总体而言,所构建的内涝模型具有较好的可靠性。

3 结果分析

3.1 空间不均匀降雨对内涝的影响分析

3.1.1 不均匀降雨情景设置

研究认为,若暴雨中心与区域常见内涝积水点重合,则会加重内涝风险,此为最不利降雨情景。因此,利用网络爬虫技术,收集了 2014—2020 年研究区的积水情况。综合考虑地形、不透水率、管段排水能力和道路状况等多重因素,在每个子汇水区均选定一个特定积水点作为暴雨中心,最终选定 4 个暴雨中心点,如图 2 所示。具体选择理由如下:①积水区域 1 内积水范围管道排水能力均小于 1~2 年一遇设计标准。其中,金水路未来路(A 点)区域晚高峰时段道路拥堵指数高达 4.0~5.0(严重拥堵),与主要积水时间段重合。②积水区域 2 内,文化路东风路(B 点)区域的排水管道能力普遍小于 1 年一遇设计标准,排水能力严重不足。同时,该区域下垫面类型以不透水的城市路面和建筑为主,不透水率高达 60%左右。③积水区域 3 内,积水区域仅涉及文化北路连霍高速(C 点)区域。该区域土地利用类型以裸土和绿地为主,透水性较

好。但管网密度相对较低,缺乏必要的管网排水设施,当发生较大暴雨时,无法快速、及时排除内涝。④积水区域 4 仅涉及红专路卫生路(D 点)区域。该区域发生内涝次数最多,附近区域排水管道建设年代久远,设计重现期低于现行《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)规定的最低限值(1 年一遇),排水能力严重不足。同时,该区域地势西南高东北低,雨水产流速度较快,汇流时间较短,增加了排水管道内部压力,且该区域道路、建筑物密集,人口高度集中,经济高度集聚,是城市防洪除涝的重点区域。综上所述,最终选择易涝点 A、B、C、D 为暴雨中心。



图 2 研究区积水点空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of waterlogging points in study area

通过对比分析郑州市城市内涝积水状况与实测降雨资料发现,约 70%的内涝积水点所对应的暴雨场次历时在 3 h 以内。基于此,统计降雨历时在 3 h 以内且降雨量达到气象部门暴雨等级标准的降雨场次,共获取 60 场降雨样本。借助这些数据,运用 GIS,采用克里金插值法对区域降雨量进行空间分析,进而得出区域平均降雨量和最大降雨量。随后,依据式(1)计算每场降雨的不均匀系数。由计算结果可知,该区域的不均匀系数 α 取值范围为 [1.6, 3.0],中位数为 1.96。

根据暴雨空间分布不均匀系数和暴雨中心位置设置了 12 种降雨情景。依据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),特大城市中心城区雨水管

道设计重现期为3~5年一遇,重要地区为5~10年一遇。本研究以5年重现期进行分析。

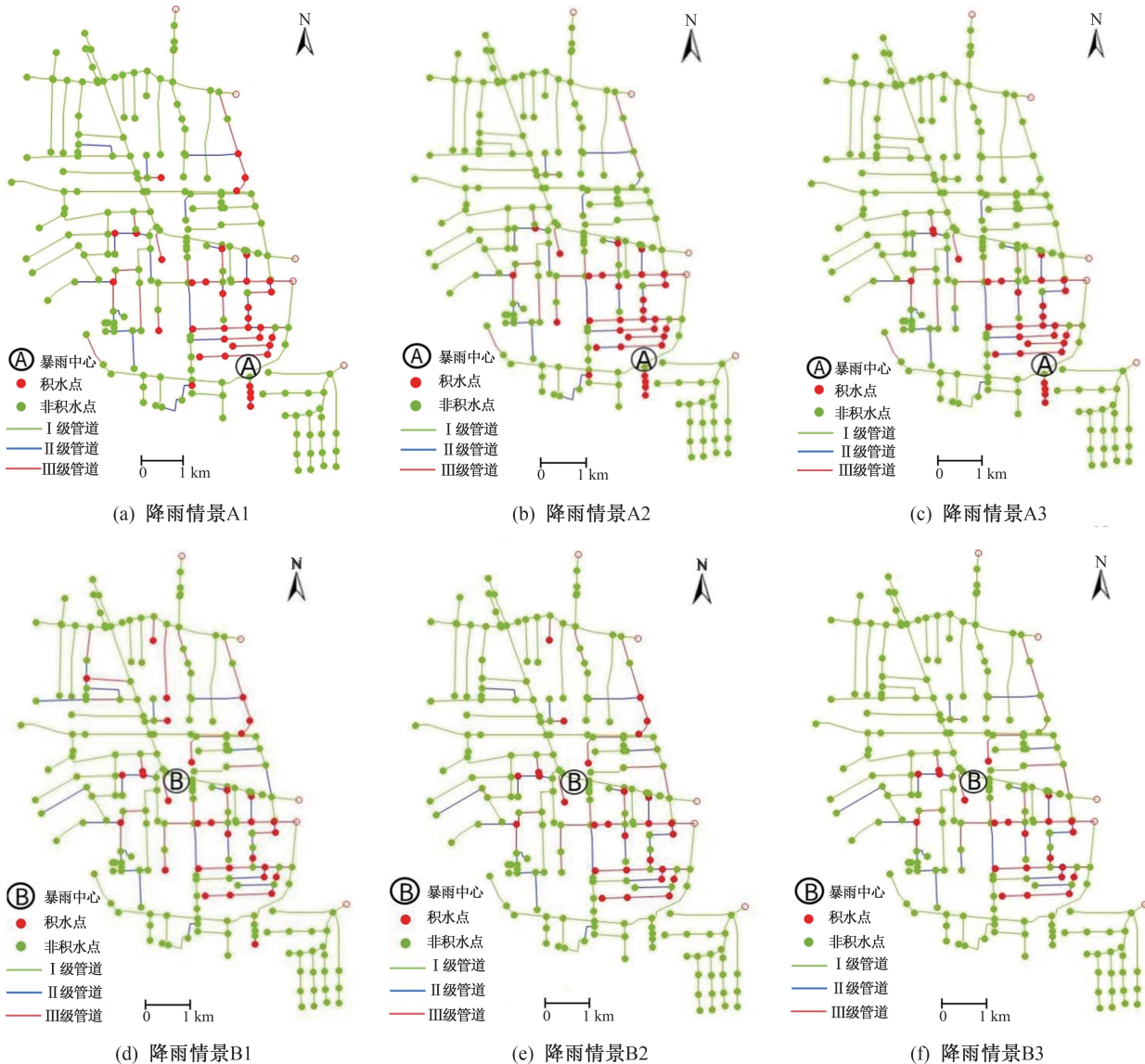
3.1.2 管道和节点特性影响分析

管道充满度是指管道中水流深度与管道内径的比值。根据管道充满度 S 的取值,可分为以下三种情况: $0 \leq S < 1$,表示管道内水深小于管道的内径,即非满管流状态; $S = 1$,表示管道内水深等于管道内径,此时管道处于满管流状态,且水力坡度小于管道坡度; $S = 2$,表示管道内水流充满管道并存在压力流,水力坡度大于管道坡度。

基于管道充满度的取值,可将管道划分为三个等级:I级对应 $0 \leq S < 1$,即非满管流状态;II级对应 $S = 1$,即满管流且水力坡度小于管道坡度的状态;III级对应 $S = 2$,即满管流且水力坡度大于管道坡度的状态。其中,II级和III级管道均处于满管流状态,故合称为满管管道。

1) 暴雨中心空间分布对管道和节点特性的影响分析。12种降雨情景下的管道长度占比和积水节点数量占比情况如图3所示。降雨情景的构建基于暴雨中心位置与降雨不均匀系数的组合。具体而言,图中A、B、C、D代表4个暴雨中心,数字1、2、3分别对应不均匀系数1.6、1.9、3.0。以A组为例,A1、A2、A3情景分别表示暴雨中心位于A点,且不均匀系数依次为1.6、1.9、3.0;B、C、D组依次类推。

由图3(a)(d)(g)(j)可知,当不均匀系数为1.60、暴雨中心分别位于A、B、C、D点时,满管管道长度占比由高到低对应的暴雨中心点为 $D > B > C > A$,积水节点数量占比由高到低对应的暴雨中心点为 $D > B > A > C$ 。当暴雨中心在A与D点时,满管管道长度占比相差约10%,积水节点数量占比相差仅2%;B点与D点间的满管管道长度占比和积水节点数量占比差值相对较小,约为1%。



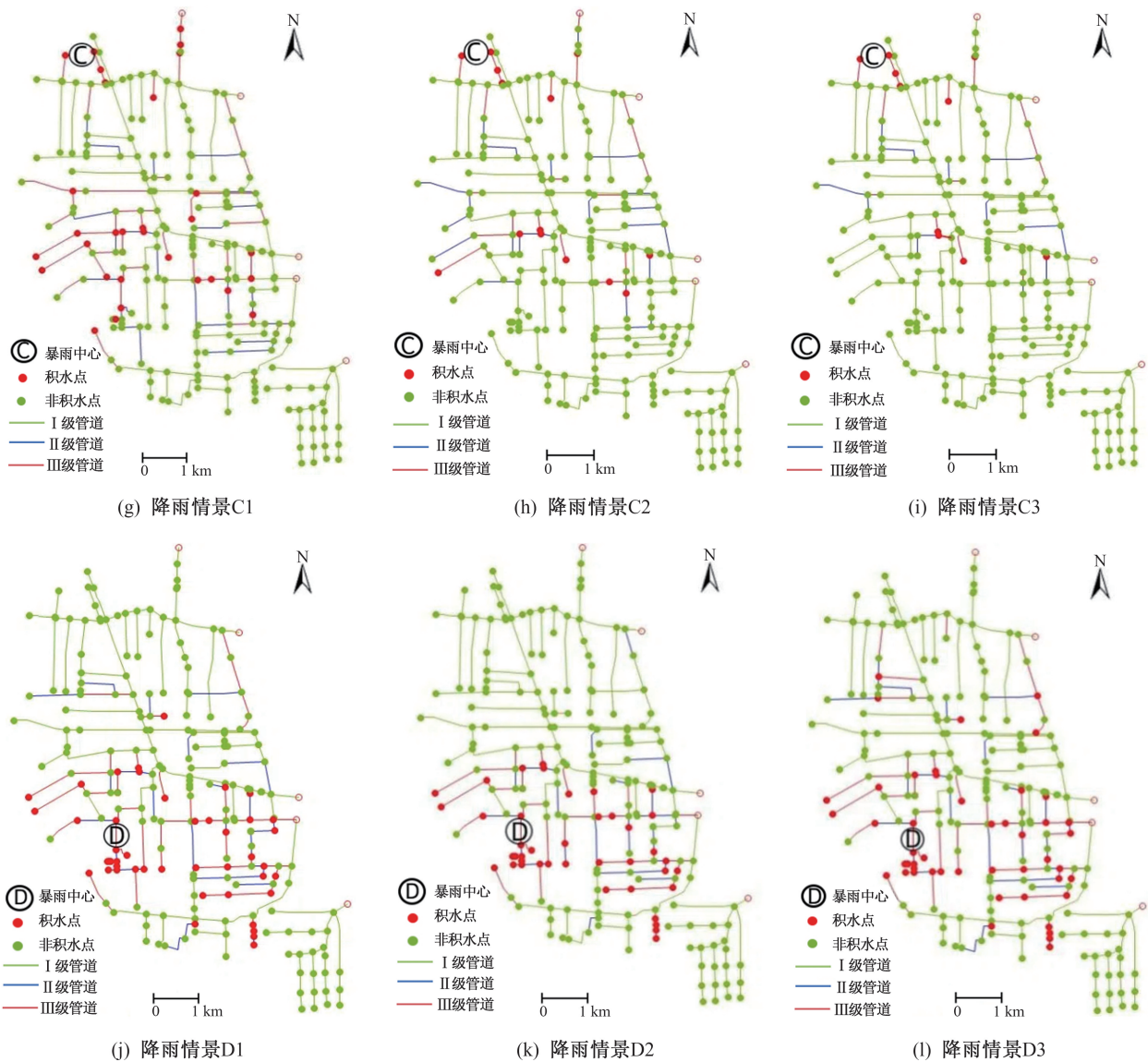


图 3 12 种降雨情景下管道长度占比和积水节点数量占比图

Fig. 3 Proportion of pipeline length and proportion of waterlogged nodes under 12 rainfall scenarios

由图 3(b)(e)(h)(k) 可知, 当不均匀系数为 1.96、暴雨中心分别位于 A、B、C、D 点时, 满管管道长度占比由高到低对应的暴雨中心点为 $D > B > C > A$, 积水节点数量占比由高到低对应的暴雨中心点为 $D > B > A > C$ 。当暴雨中心位于 C 与 D 点时, 满管管道长度占比相差约 10%, 积水节点数量占比相差约 15%。

由图 3(c)(f)(i)(l) 可知, 当不均匀系数为 3.0、暴雨中心分别位于 A、B、C、D 点时, 满管管道长度占比和积水节点数量占比由高到低对应的暴雨中心点为 $D > B > A > C$ 。当暴雨中心位于 C 与 D 点时, 满管管道长度占比相差约 15%, 积水节点数量占比相差约 20%; 而 A 点与 B 点之间的满管管道长度占比和积水节点数量占比差值相对较小, 仅为 2%。

2) 暴雨不均匀系数对管道和节点特性的影响分析。由图 3 可知, 各暴雨中心 I 级管道长度占比随着不均匀系数的增加而增加, II 级、III 级满管管道长度占比随着不均匀系数的增加而降低。其中, 当暴雨中心位于 C 点时, 满管管道长度占比下降最快, 下降约 15%。当暴雨中心位于 A、B、D 点时, 积水节点数量随着不均匀系数的增加而增加, 当不均匀系数增至 1.9 时, 暴雨中心 D 下的积水节点数量占比增加最多, 增加约 5%; 当暴雨中心位于 C 点时, 积水节点数量随着不均匀系数的增加而下降, 下降约 8%。

3.1.3 内涝积水影响分析

1) 暴雨中心空间分布对内涝积水的影响分析。模拟得到的 12 种降雨情景下内涝积水情况如图 4 所示。

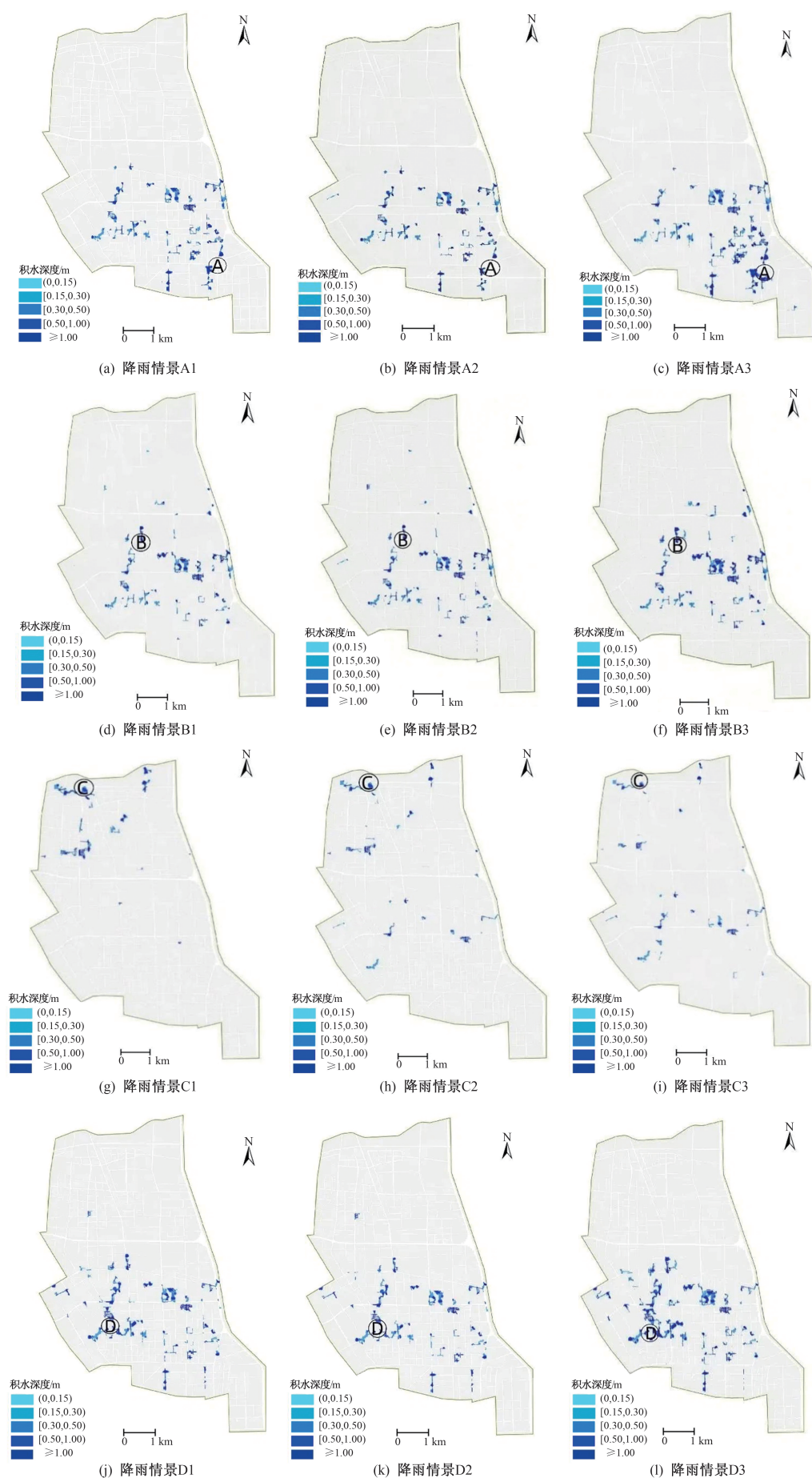


图4 12种降雨情景下内涝积水图

Fig. 4 Maps of urban inundation under 12 rainfall scenarios

由图 4(a)(b)(c)可知:当暴雨中心位于 A 点时,内涝集中于研究区南部,北部无积水;当暴雨中心位于 B 点时(图 4(d)(e)(f)),内涝主要集中于研究区中部,积水的空间分布范围相较于 A 点时有所扩大;当暴雨中心位于 C 点时(图 4(g)(h)(i)),内涝主要集中于研究区北部,南部有少量积水,积水分布范围最大但积水面积最少;当暴雨中心位于 D 点时(图 4(j)(k)(l)),内涝空间分布与暴雨中心位于 A、B 点时大致相同,主要集中分布于研究区南部,但积水面积更大且积水深度更深。

通过对管道和节点特性以及内涝积水情况的综合分析可知:①在不均匀系数分别为 1.6、1.96、3.0 条件下,暴雨中心位于 D 点时,内涝情况最为严重。其主要原因是该区域排水管道普遍小于 1 年一遇设计标准,排水能力严重不足。此外,该区域地势西南高东北低,雨水产流速度较快,汇流时间较短,增加了排水管道内部压力。②暴雨中心位于 A、B 点时,由于其管道排水能力均小于 1~2 年一遇设计标准,且下垫面类型相似,主要为不透水的城市路面和建筑,因此二者的内涝情况相差不大。③暴雨中心位于 C 点时,由于其排水管道普遍大于 3 年一遇设计标准,并且下垫面主要由裸土和绿地组成,透水性较好,因此内涝情况较轻微。这说明管道排水能力是影响暴雨中心周边区域内涝程度的主要因素,同时也凸显了暴雨中心位置的下垫面条件以及地形对内涝程度的重要影响。

2)暴雨不均匀系数对内涝积水的影响分析。由图 4(a)(b)(c)可知,随着不均匀系数的增大,积水的空间分布范围基本保持一致,但积水深度和积水面积均增加。其中,在不均匀系数 $\alpha=3.0$ 的条件下,暴雨中心 A 点附近超过 0.5 m 深度的积水面积显著增加,降雨情景 A3 的积水面积相对于 A1 的增加了 343 978 m²。

由图 4(d)(e)(f)可知,随着不均匀系数的增大,积水深度和积水面积均增加。当不均匀系数 $\alpha=1.96$ 时,积水的空间分布范围与 $\alpha=1.6$ 时保持一致,但超过 0.15 m 的积水面积小幅度增加,降雨情景 B2 的积水面积相对于 B1 的增加了 6 175 m²;当不均匀系数 $\alpha=3.0$ 时,暴雨中心 B 点南部的积水范围没有显著变化,但深度超过 0.5 m 的积水面积显著增加,降雨情景 B3 的积水面积相对于 B1 的增加了 173 175 m²,同时北部地区积水范围减少且向 B 点集中。

由图 4(g)(h)(i)可知,随着不均匀系数的增

大,积水空间分布范围开始收缩,并且趋向于向暴雨中心 C 点周围集中。当不均匀系数 $\alpha=3.0$ 时,暴雨中心 C 点附近超过 0.5 m 深度的积水面积显著增加,降雨情景 C3 的积水面积相对于 C1 的增加了 209 489 m²。

由图 4(j)(k)(l)可知,随着不均匀系数的增大,积水深度和积水面积均增加。当不均匀系数 $\alpha=1.96$ 时,积水的空间分布范围与 $\alpha=1.6$ 时保持一致,但积水深度有所增加,增加了 0.3 m 左右。当不均匀系数 $\alpha=3.0$ 时,暴雨中心 D 点附近深度超过 0.5 m 的积水面积显著增加 412 684 m²,北部地区无积水。

3.2 “不均匀降雨-管道淤积”复合情景对内涝的影响分析

3.2.1 “不均匀降雨-管道淤积”复合情景

通过对空间不均匀降雨对内涝的影响分析可知,在不均匀系数分别为 1.6、1.96、3.0 条件下,暴雨中心位于 D 点时,内涝情况最为严重;随着不均匀系数的增加,一维、二维内涝特征均表现为向暴雨中心集中,加剧了该区域的内涝情况。因此,选取不均匀系数 $\alpha=3.0$ 且暴雨中心位于 D 点的降雨情况作为最不利情景。

由于研究区排水管道管径各不相同,用沉积物高度无法准确表达某一管段的淤积程度,因此本研究用管道淤积系数衡量管道淤积程度,其计算公式如下:

$$SC = \frac{h}{d} \quad (8)$$

式中:SC 为管道淤积系数; h 为管道淤积物深度, m; d 为排水管道直径, m。

排水管道情景设置的具体步骤为:首先,对所有管道取同一淤积系数,分别为 0.0、0.1、0.2、…、0.9;然后,由淤积系数计算得到淤积物高度并输入至 InfoWorks ICM 模型,即可生成 10 种淤积情景。需要说明的是,由于文章篇幅有限,本研究仅展示 SC 分别为 0、0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 时的管道和节点状态图以及内涝积水图。

3.2.2 “不均匀降雨-管道淤积”复合情景内涝模拟分析

不同淤积系数下的管道和节点状态如图 5 所示。随着管道淤积系数的增大,满管管道长度占比和积水节点的数量均呈上升趋势。当 $SC=0.1$ 时,Ⅱ级、Ⅲ级管道长度占比均增加;当 $SC>0.3$ 时,Ⅱ级管道长度占比减少,Ⅲ级管道长度占比急剧增加;当 $SC=0.9$ 时,Ⅲ级管道长度占比已达到饱和

状态,仅小幅度增加。随着管道淤积系数的增大, 北部开始出现超载管道和积水节点,且越来越多。

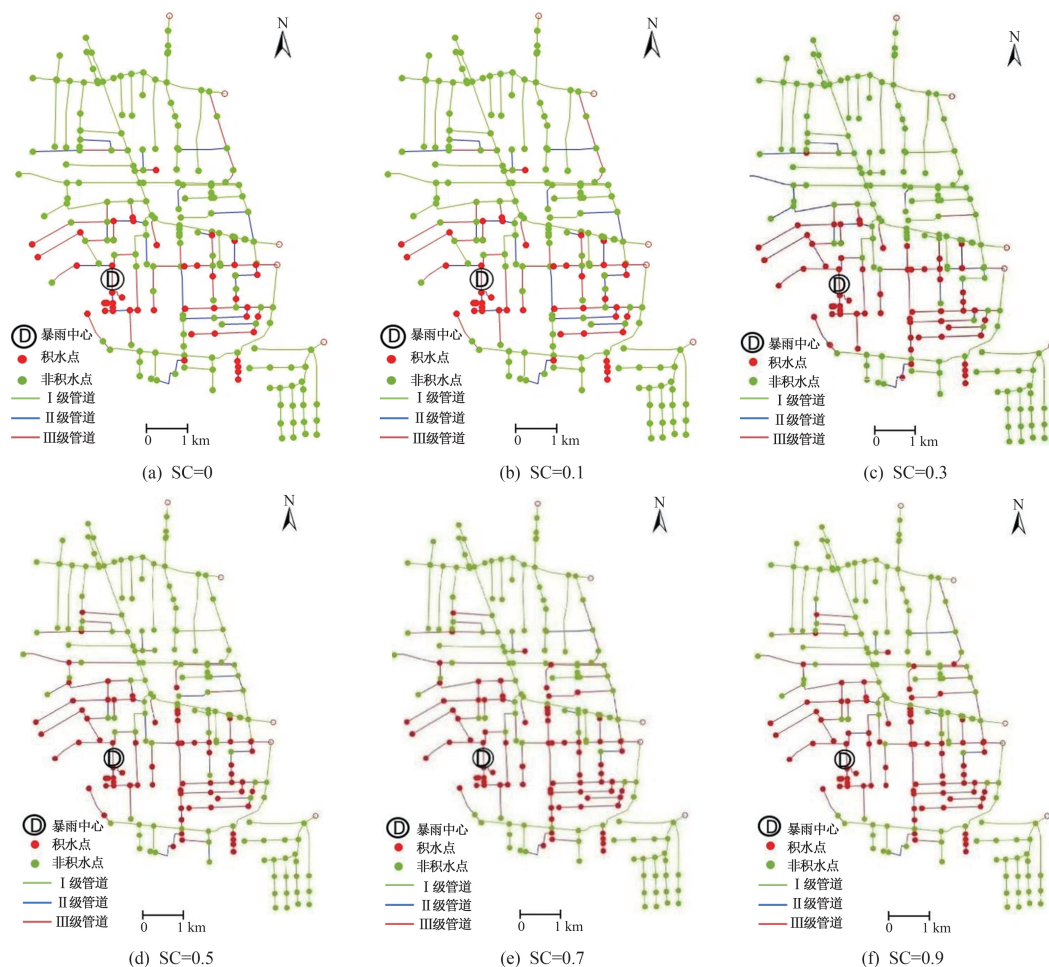
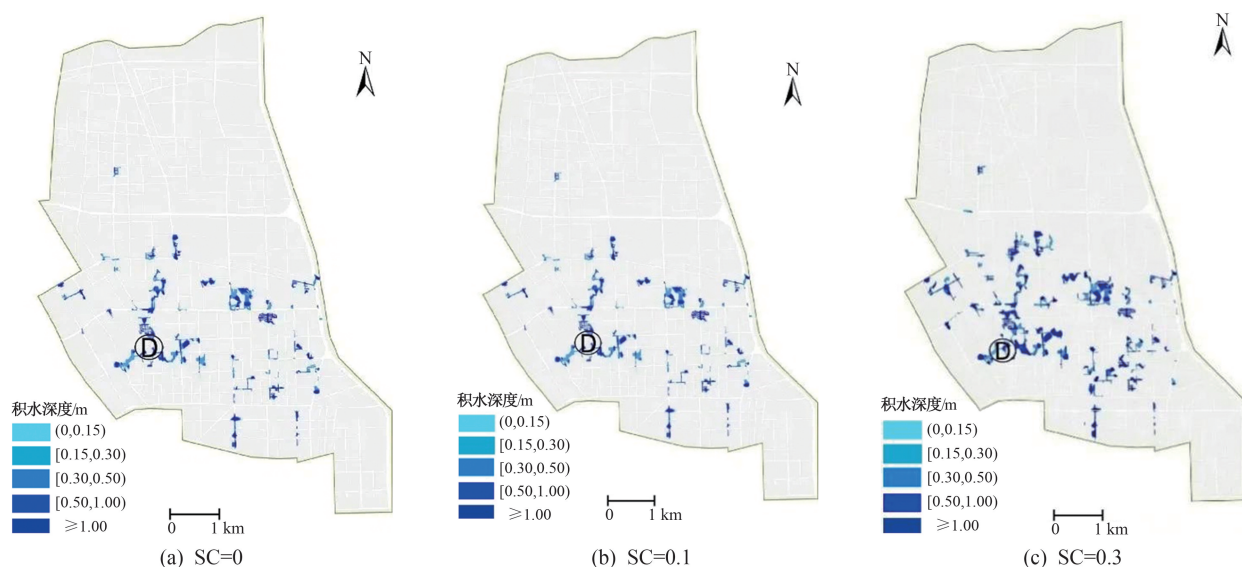


图5 不同淤积系数下的管道和节点状态图

Fig. 5 Diagrams of pipeline and node status under different siltation coefficients

不同淤积系数下的内涝积水情况如图6所示。随着SC的增大,积水深度和积水面积均增加。当SC为0.3、0.5时,研究区的积水面积大幅度增加,较SC=0.1时的分别增加了242 701、209 854 m²;

当SC=0.9时,研究区积水已达到饱和。即使北部管道排水能力较强,多数为10年一遇及以上标准,但随着SC的增大,北部开始出现积水,且积水面积越来越大。



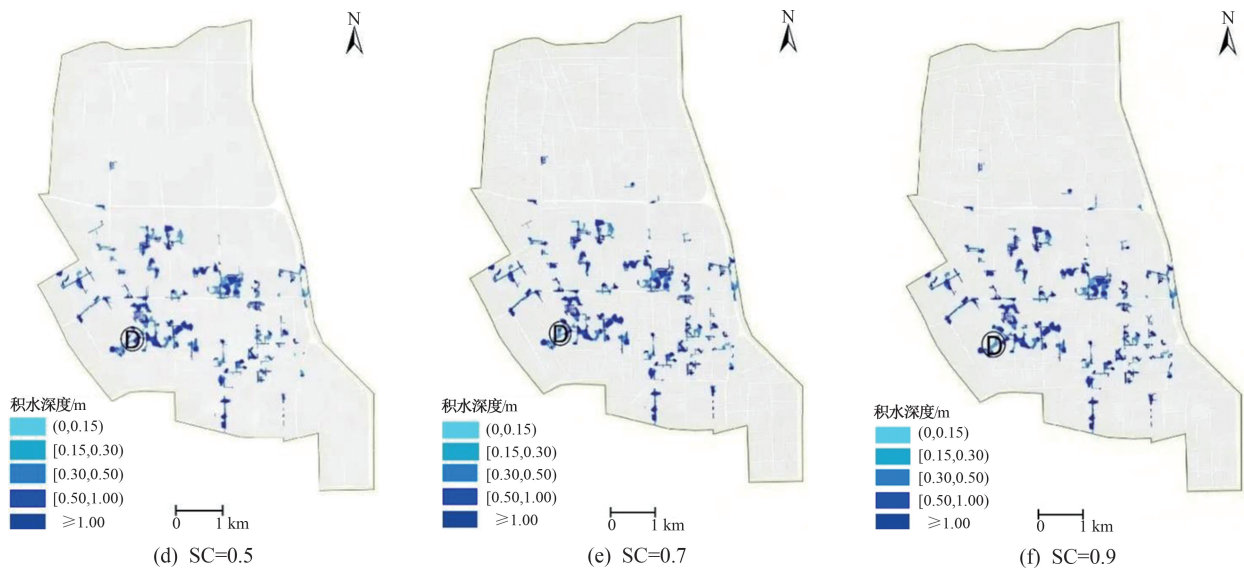


图 6 不同淤积系数下的内涝积水图

Fig. 6 Maps of urban inundation under different siltation coefficients

4 结论

本研究通过构建空间不均匀降雨模型,结合 InfoWorks ICM 模型,模拟不同降雨情景及“不均匀降雨-管道淤积”复合情景下的城市内涝过程,得出以下结论:

1) 在不均匀系数分别为 1.6、1.96、3.0 的条件下,研究区内涝严重程度的排序为:暴雨中心 D(红专路卫生路)>A(金水路未来路)>B(文化路东凤路)>C(文化北路连霍高速)。不同暴雨中心的内涝程度存在差异,其主要受周边管道排水能力的影响。同时,暴雨中心下垫面条件和地形也是影响内涝程度的关键因素。

2) 随着不均匀系数的增大,降雨强度在暴雨中心附近地区更加集中,进而加剧了该区域的内涝程度。研究区的满管管道长度占比和积水节点数量占比整体随着距暴雨中心距离减小而升高,随距离增大而降低。内涝积水的空间分布特征表现为向暴雨中心集中,导致该区域积水深度和面积显著增加,内涝程度增加。

3) 在最不利降雨情景下,随着管道淤积系数的增大,满管管道长度占比和积水节点的数量均呈上升趋势,积水深度和积水面积均增加。当 $SC > 0.3$ 时,Ⅱ级管道长度占比减少,Ⅲ级管道长度占比急剧增加。当 $SC = 0.3$ 时,降雨情景 D3 的积水面积相对于 D1 的大幅度增加,增加了 $242\,701\text{ m}^2$ 。

鉴于实际管道淤积数据获取难度较大,为有效揭示淤积程度对城市内涝的影响机制,本研究在管道淤积情景设置时,对所有管道采用同一淤积系数

开展情景分析。这种方法存在一定理想化倾向,忽略了不同管道间的实际差异性。同时,本研究仅选取不均匀系数为 3.0 且暴雨中心位于 D 点的降雨情况作为最不利情景,以此叠加淤积状况进行分析。未来研究应充分考虑管道淤积的空间异质性,以及降雨不均匀程度下淤积对城市内涝影响的差异,进一步提升模型的全面性与准确性。

参 考 文 献

- [1] 赵超辉,万金红,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 Chaohui, 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.]
- [2] Purwar S, Mohapatra G N, Rakesh V. Simulation of flood associated with extreme rainfall events over the urban city, Bengaluru, India[J]. Natural Hazards, 2026, 122(7):313.
- [3] Maier R, Krebs G, Pichler M, et al. Spatial rainfall variability in urban environments: high-density precipitation measurements on a city-scale[J]. Water, 2020, 12(4):1157.
- [4] Kalu I, Ndehedehe C E, Ferreira V G, et al. Machine learning assessment of hydrological model performance under localized water storage changes through downscaling [J]. Journal of Hydrology, 2024, 628:130597.
- [5] Vinod D, Mahesha A. Modeling non-stationary 1-hour extreme rainfall for Indian river basins under changing climate[J]. Journal of Hydrology, 2025, 652:132669.
- [6] Jin Tao, Zhou Yuliang, Zhou Ping, et al. Spatiotemporal evolution of precipitation concentration in the Yangtze River Basin (1960-2019): associations with extreme heavy precipitation and validation using GPM IMERG[J]. Remote Sensing,

- 2025,17(15):2732.
- [7] 王复明,李斌,方宏远.含脱空、腐蚀病害地下管道高聚物注浆修复试验与数值研究[J].隧道与地下工程灾害防治,2019,1(3):1-8. [Wang Fuming, Li Bin, Fang Hongyuan, et al. Experimental and numerical study on polymer grouting repair of underground pipeline with void and corrosion diseases[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2019,1(3):1-8.]
- [8] Di Danyang, Wang Ruoyi, Fang Hongyuan, et al. High-resolution analysis of hydraulic response characteristics of silted stormwater pipeline and manholes in urban catchments using GASM-TranGRU and CFD-DEM[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2025,19:2447389.
- [9] Khan S T, Wynn-Thompson T, Sample D, et al. Effectiveness of stormwater control measures in protecting stream channel stability[J]. Hydrological Processes, 2024,38(6):e15178.
- [10] Li Tianwei, Di Danyang, Chen Zhe, et al. Numerical investigation on the evolution process of hydraulic transport and over-current blockage of silted urban rainwater pipelines: an approach based on computational fluid dynamics and discrete element method[J]. Physics of Fluids, 2024,36(12):127116.
- [11] Singh A, Dawson D, Trigg M A, et al. Drainage representation in flood models: application and analysis of capacity assessment framework[J]. Journal of Hydrology, 2023,622:129718.
- [12] 张金萍,张朝阳,左其亭.郑州“7·20”极端降雨的城市内涝模拟及风险评估[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(2):1-7,63. [Zhang Jinping, Zhang Zhaoyang, Zuo Qiting. Urban waterlogging simulation and risk assessment of “7·20” extreme rainfall in Zhengzhou[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023,44(2):1-7,63.]
- [13] 张金萍,李玉达,左其亭,等.城市洪涝应急响应能力评价及优化研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(4):8-15. [Zhang Jinping, Li Yuda, Zuo Qiting, et al. Evaluation and optimization of urban flood emergency response capacity[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024,45(4):8-15.]
- [14] 林若洲.考虑暴雨空间不均匀性的城市内涝特征与优化改扩建研究[D].杭州:浙江大学,2022. [Lin Ruozhou. Research on urban flooding properties and drainage system rehabilitation under spatially variable rainfall[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.]
- [15] 张金萍,张浩锐,方宏远.基于SWMM和SCS法的城市内涝模拟及雨水管网系统评估[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):110-121. [Zhang Jinping, Zhang Haorui, Fang Hongyuan. Urban waterlogging simulation and rainwater pipe network system evaluation based on SWMM and SCS method[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022,20(1):110-121.]

Study on Impact of Spatially Non-Uniform Rainfall and Pipeline Siltation on Urban Waterlogging

ZHANG Jinping^{1,2}, WANG Ruyu¹, ZHANG Lixin³, LI Xuechun¹, LI Zhiwei¹

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Yellow River Ecological Protection and Regional Coordinated Development Research Institute, Zhengzhou 450001, China;

3. North Minzu University, Yinchuan 750030, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the mechanism by which the coupling effect of spatially non-uniform rainfall and pipeline siltation influences urban waterlogging, thereby providing a scientific basis for optimized design of urban drainage systems and precise prevention and control of waterlogging risk. **[Methods]** Taking a sub-catchment in the central urban area of Zhengzhou as the research object, a spatially non-uniform rainfall model reflecting actual rainfall characteristics was constructed. InfoWorks ICM was used to simulate urban waterlogging responses under different rainstorm center locations, non-uniformity coefficients, and levels of pipeline siltation. **[Results]** (1) The degree of waterlogging differed among rainstorm centers, with the severity ranked as D (Hongzhuan Road-Weisheng Road) > A (Jinshui Road-Weilai Road) > B (Wenhua Road-Dongfeng Road) > C (Wenhua North Road-Lianhuo Expressway). This difference was mainly influenced by the drainage capacity of the pipe network, underlying surface types, and topographic conditions around each rainstorm center. (2) As the rainfall non-uniformity coefficient increased, rainfall intensity became more concentrated at the rainstorm center, significantly increasing inundation depth and area, and the spatial distribution of waterlogging showed a tendency to cluster toward the center.

(下转第59页)

(1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Northwest Engineering Corporation Limited, Power China, Xi'an 710065, China; 3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore effective approaches for improving the accuracy and efficiency of monthly runoff prediction under changing environmental conditions, thereby providing theoretical guidance for flood and drought prevention and efficient allocation and management of water resources in the Yellow River Basin. **[Methods]** Based on the idea of decomposition-aggregation-high-frequency combined modal secondary decomposition-prediction, improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (ICEEMDAN), variational mode decomposition (VMD), and long short-term memory (LSTM) neural network were combined to develop a runoff prediction model based on secondary decomposition of high-frequency combined modes. Monthly runoff series from 1960 to 2019 at Tangnaihui hydrological station in the Yellow River Basin were used for a case study. **[Results]** (1) The high-frequency combined modal secondary decomposition model achieved higher prediction accuracy for monthly runoff series than the LSTM and ICEEMDAN-LSTM models, especially during the testing period. (2) Compared with the LSTM and ICEEMDAN-LSTM models, the RMSE of the proposed model decreased by 43.61% and 32.90%, respectively, while the corresponding NSE increased by 18.45% and 9.78%, respectively. (3) Compared with the ICEEMDAN-VMD-LSTM model, the prediction efficiency of the proposed model increased by 31.12%. **[Conclusions]** The high-frequency combined modal secondary decomposition runoff prediction model has significant effectiveness and practicability and can provide an effective reference for water resources management in the Yellow River Basin under changing environmental conditions.

Keywords: ICEEMDAN; VMD; runoff prediction; sample entropy; LSTM; Yellow River Basin

(编辑:韩小燕)

(上接第 48 页)

(3) Under unfavorable rainfall scenarios, pipeline siltation had an obvious threshold effect on waterlogging risk. When the siltation coefficient exceeded 0.3, the proportion of severely silted pipes (Class III) increased sharply, and inundation area increased substantially. **【Conclusions】** The spatial heterogeneity of rainfall significantly increases the risk of localized flooding. Once sediment accumulation in pipelines reaches a certain level, it can trigger cascading failures in the drainage system. The coupled effects of these two factors further exacerbate urban flooding. It is recommended that, in the planning and upgrading of urban drainage systems, priority be given to improving the capacity of pipe networks and conducting regular sediment removal and maintenance in areas prone to storm centers, thereby enhancing the overall resilience of the system.

Keywords: spatially non-uniform rainfall; spatial non-uniformity coefficient; two-dimensional truncated Gaussian distribution; pipe siltation

(编辑:李珊珊)