

引用格式: 黄勇,孙傲,朱芝铮,向姮玲. 山地城市大排水系统级联失效机制研究——以重庆市渝中区为例[J]. 山地学报,2023,41(1):115-128.

HUANG Yong, SUN Ao, ZHU Zhizheng, XIANG Hengling. Cascading failure mechanism of major rainwater drainage system in mountainous city: A case study of Yuzhong district of Chongqing, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(1):115-128.

山地城市大排水系统级联失效机制研究 ——以重庆市渝中区为例

黄勇¹,孙傲¹,朱芝铮¹,向姮玲²

(1. 重庆大学 建筑城规学院,重庆 400030; 2. 重庆大学建筑规划设计研究总院有限公司,重庆 400045)

摘要:城市大排水系统是由道路、自然通道、明渠、滞水地与调蓄设施等构成的过量地表径流排蓄系统。大排水系统因其排蓄过程的开放性特点,极易引发溢流失控、交通中断或城市用地滞水等级联效应,是城市内涝问题的关键诱因之一。现有研究对大排水系统的定量分析不足,更缺乏对其在山地城市中的级联失效机制研究。本文以重庆市渝中区为靶区,采用复杂网络分析方法,构建大排水系统级联失效模型,刻画地表溢流传播过程,挖掘山地城市大排水系统级联失效原理及其基本规律。研究表明:(1)模拟大排水系统级联失效的区域与往年靶区内涝区域基本一致;(2)当其他不确定性因素稳定时,开敞的地表环境会降低靶区大排水系统的过载程度,减缓内涝持续时间及发生程度,而地表环境的开敞程度与内涝发生区域并不相关;(3)地表溢流在山地地形下更易集聚在构成大排水系统的部分物质要素当中,暴雨增大会加剧这种集聚趋势,而开敞的地表环境则会加大地表溢流的空间分流程度,以此减小这种集聚趋势;(4)靶区内小范围的低洼、平坦地形,会使地表溢流易集聚或蔓延,而大范围的山地起伏地形在加快地表溢流排蓄的同时,能控制靶区内地表溢流蔓延。本研究可为山地城市大排水系统规划建设提供科学依据,提升排涝防涝能力水平。

关键词:山地城市;内涝;大排水系统;级联失效;溢流传播;重庆

中图分类号:

文献标志码: A

近年来,极端降雨所引起的城市内涝灾害频发。国内“7·20 郑州特大暴雨”“6·11 重庆特大暴雨”“7·12 北京特大暴雨”以及国外 2021 年 7 月“欧洲破纪录极端暴雨”等事件,造成人民群众生命财产重大损失。中国“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要明确提出,要建设“源头减排、蓄排结合、排涝除险、超标应急”的城市防洪排涝体系,推动城市内涝治理取得明显成效^[1-2]。

城市内涝是一种多时空尺度水文过程,目前仍无法完全规避^[3]。城市内涝的原因可以归结为气候变化与城市化两类^[4-6],涉及暴雨过程、地形本

底、地表环境、管网系统性能等四个方面因素。这些因素导致地表径流集聚或扩散,最终引发内涝^[7]。部分西方发达国家城市较早开始构建大、小两套排水系统^[8]。其中,小排水系统一般是指市政管网系统,应对重现期 10 a 内的高频次、低强度常降雨事件;大排水系统则是由道路、自然通道、明渠、滞水地与调蓄设施等物质要素构成的过量地表径流排蓄系统,应对重现期 10~100 a 的低频次、高强度极端暴雨事件^[9]。但大排水系统在用于过量地表径流排蓄时,因其排蓄过程的开放性特点,极易引发溢流失控、交通中断或城市用地滞水等级联效应,是城市内

收稿日期(Received date): 2022-08-21;改回日期(Accepted date):2023-02-18

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划(2018YFD1100804)。[National Key Research and Development Program (2018YFD1100804)]

作者简介(Biography): 黄勇(1976-),男,教授,博士,主要研究方向:山地人居网络,山地城市规划设计。[HUANG Yong (1976-), male, professor, Ph. D., specialized in mountain habitat network, planning and design of mountainous cities] E-mail: hyong@cqu.edu.cn

涝问题的关键诱因之一^[9-10]。

城市大排水系统的国内外相关研究大致可分为理论模式与定量模拟两方面。理论模式研究重在提升现有雨洪管理模式的整体性以及地域适应性^[11-12]。定量模拟研究则以传统模拟为主,并逐步向精确模拟和复杂系统模拟转变。

传统模拟研究多基于现有各类雨洪模型,模拟小排水系统过载后的局部地表溢流特征,并提出策略^[13]。这类研究充分肯定城市道路等对地表径流排蓄的积极作用^[14-15],但由于现有各类雨洪模型的适用性与精度有限,无法避免小排水系统的结构故障或功能受损所带来的不确定性风险^[16-17]。因此,提升雨洪模型地域适用性与精度,或开发神经网络等新的雨洪模型^[18],是当前传统模拟研究走向精确模拟研究的重点^[16]。

精确模拟更注重现实的复杂水文过程^[16-17],但精确模拟仍受知识与数据有限性限制,无法完全有效规避各类不确定性风险^[3-4]。相较于精确模拟研究,复杂系统研究更偏向于探索系统整体与局部功能在不确定性风险下的动态响应机制^[19-20],如随机攻击或局部攻击下的道路系统可靠性或韧性规律^[21-23]。有研究者结合水文模型与复杂网络分析方法研究了道路径流的传播影响,发现道路系统会因少量超过阈值的不稳定径流风险而引发级联失效^[7],明确指出了地表溢流沿道路网络的级联传播会导致内涝过程的复杂性与随机性大大增加^[22]。对此,相关研究开始针对城市雨洪级联效应问题展开探讨^[24]。

在以空间干预为目标的研究中,定量分析多集中于小排水系统,针对大排水系统仍然非常薄弱。尽管有学者^[4,10]已经开展了大排水系统受城市复杂地形与复杂地表径流环境影响下的定性分析,但并未明确大排水系统的级联失效机制,对地形复杂城市的地表溢流传播过程及内涝成因仍认识不足,更缺少极端情景下大排水系统级联失效过程及空间原理的研究。就国内而言,直到近几年才逐渐提及大排水系统,相关研究和实践仍处于相对空白的状态^[25-26]。

综上,本文在城乡规划学、复杂网络科学等前沿交叉领域,围绕山地城市大排水系统级联失效机制关键科学问题,选取中国地形复杂、海拔变化大、气候多样性高、雨型多变、人工干预强度大的典型山地

城市重庆市渝中区为靶区^[27-30],在界定暴雨过程、地形本底、地表环境、管网系统性能四类不确定性因素边界条件的基础上,建立对山地城市地表溢流传播场景的理论认识,揭示山地城市大排水系统的级联失效原理及其基本规律,以期完善我国山地城市大排水系统相关理论,为山地城市大排水系统规划建设提供科学依据。

1 大排水系统级联失效过程

大排水系统级联失效,是指构成大排水系统的道路、自然通道、滞水绿地等物质要素发生过载失效后,溢出的地表径流引起周边相邻或地势较低的物质要素也发生过载失效,从而产生级联传播效应,最终导致大排水系统中相当一部分物质构成要素过载失效。山地城市大排水系统级联失效机制,则是指大排水系统在山地城市多重不确定性因素下的级联失效原理及规律。

实践证明,小排水系统能力有限,耗巨资提标,仍难以有效应对多变的极端暴雨^[17]。当地表径流到达一定程度时,小排水系统往往会出现系统性过载,地表溢流无法再通过小排水系统排蓄,便需要依靠大排水系统。大排水系统级联失效过程通常可概述为四个阶段:当城市遭遇极端暴雨时,用地、道路会产生径流并汇入小排水系统,此时小排水系统排蓄状态正常,地表无明显积水(图 1a);当极端暴雨超出小排水系统排蓄阈值后,地表溢流无法再通过小排水系统排蓄,此时大排水系统开始运行,城市范围内开始出现点状溢流与线状溢流(后文简称“点溢”“线溢”),且极易通过道路网络发生级联传播,地表出现轻微内涝与行洪(图 1b);随着极端暴雨继续增大,点溢与线溢的程度和范围不断加剧,地表内涝与行洪明显(图 1c);当极端暴雨进一步增大,超出大排水系统部分要素的溢流阈值后,城市范围内出现面状溢流(后文简称“面溢”),会通过城市道路与用地发生级联传播,导致地表出现较大范围内涝(图 1d),由此形成大排水系统级联失效过程。显然,大排水系统级联失效过程伴随点溢、线溢与面溢三种形式同时存在。然而,当前城市普遍未对大排水系统进行规划引导,地表溢流沿现状大排水系统发生级联传播的过程通常也未进行控制,极易诱

发内涝,影响城市功能运行,甚至瘫痪^[9]。

在地形复杂的山地城市中,暴雨过程、地形本底、地表环境与小排水系统性能的不确定性更大,使得内涝过程更复杂(图2)。如山地地形本底通常会导致地表径流产汇过程的效率更高,形成规模更大的地表径流,并提高地表径流的传播速率,减少蒸发和下渗等消减过程。

同时复杂的地表环境对地表溢流传播过程的干扰很大。在局部区域,封闭的地表环境有可能

完全限制面溢,如隧道或两侧堡坎的道路,地表溢流只能以线溢方式传播和点溢方式累积(图3a)。相反,开敞的地表环境则可能完全不限制面溢,如开敞的硬质广场,地表溢流不仅能以线溢方式传播和点溢方式累积,部分线溢与点溢区域同时也能以面溢方式传播(图3b)。所以通常情况下,地表溢流的传播都介于以上两种边界情景之间,也对应着大排水系统的线溢与面溢两种级联失效情景。

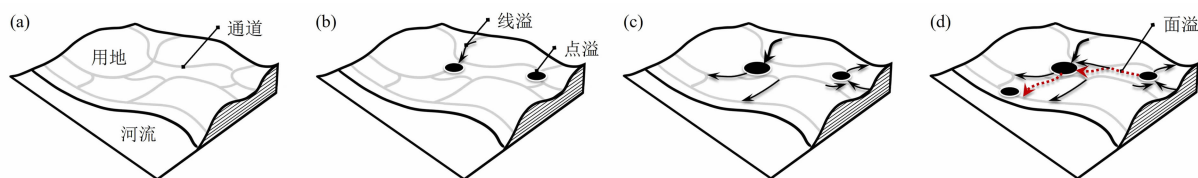


图1 山地城市大排水系统级联失效过程:(a)小排水系统正常运行;
(b)点溢与线溢出现;(c)点溢与线溢加剧;(d)面溢出现

Fig. 1 Cascade failure process of major drainage system in mountainous cities: (a) normal operation of the small drainage system;
(b) occurrence of point overflow and line overflow; (c) intensification of point overflow and line overflow; (d) occurrence of surface overflow



图2 山地城市内涝过程的不确定性边界条件

Fig. 2 Uncertain boundary conditions of waterlogging process in mountain cities

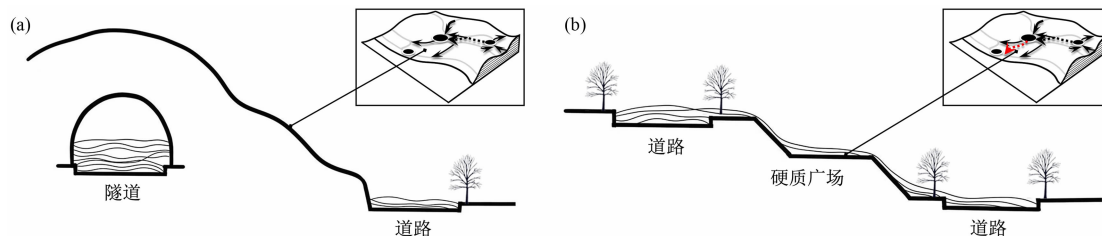


图3 不同地表环境下山地城市大排水系统级联失效情景:(a)封闭的地表环境;(b)开敞的地表环境

Fig. 3 Cascade failure scenarios of major drainage systems in mountain cities under different surface environments:

(a) closing surface environment; (b) opening surface environment

2 研究设计

2.1 技术路线

依据研究目标构建技术路线如下(图4):首先,以典型山地城市重庆市渝中区为靶区,进行特征挖掘;其次,结合复杂网络分析模型等技术方法,构建大排水系统级联失效模型,进行计算模拟;然后,依据模拟计算结果与实际内涝位置对比,验证技术方法的有效性,同时挖掘靶区山地城市大排水系统级联失效空间原理及基本规律;最后,从城乡规划视角出发,进行策略展望,反馈研究目标。

2.2 靶区特征挖掘

重庆市渝中区经纬度位置为 $29^{\circ}31'50'' \sim 29^{\circ}34'20''N$ 、 $106^{\circ}28'50'' \sim 106^{\circ}35'10''E$,是典型山地城市,

拥有滨江半岛特殊地形,其三面环水,东西向狭长,南北跨度平均不足 2 km,而境内最高处鹅岭与最低处朝天门相对高差则达到了 227 m。同时,现状调研与内涝年份记录表明,构成渝中区大排水系统的物质要素主要是道路,少数位置有自然通道与滞水地,整体未进行空间规划引导,每年汛期均有不同程度的积水、内涝事件发生。故以渝中区作为靶区具有典型性与特殊性(图5)。

研究根据对应内涝年份气象降雨记录,以渝中区 20 a、50 a 与 100 a 重现期的 2 h 设计暴雨雨型作为暴雨过程,以 10 a 重现期的 2 h 设计暴雨峰值与暴雨强度公式计算值为基础,求得两者均值作为渝中区小排水系统受损状态下的阈值(图6)。

2.3 级联失效模型构建

大排水系统级联失效模型由径流语义与级联语

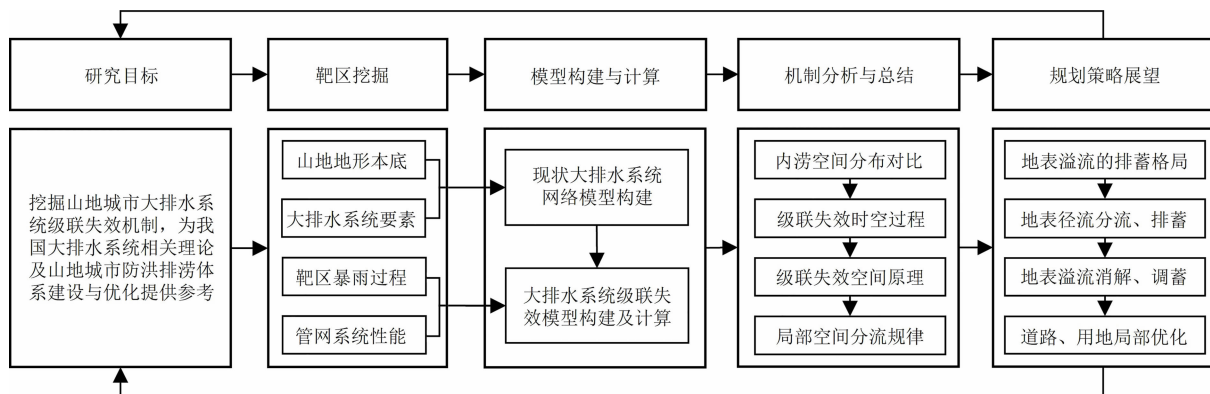


图4 技术路线

Fig.4 Technology roadmap

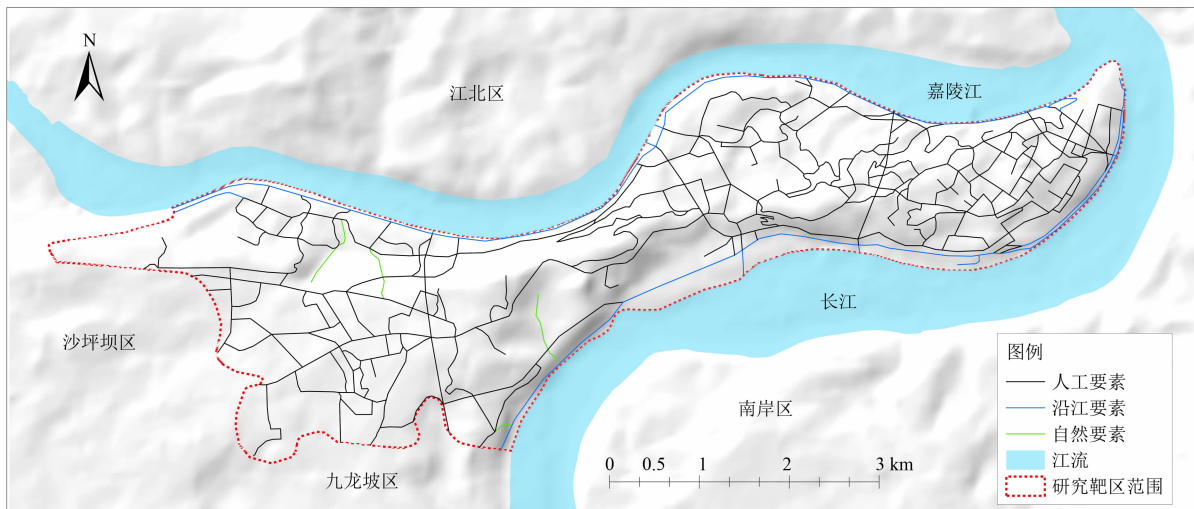


图5 渝中区地形地貌及大排水系统特征

Fig.5 Topography and characteristics of major drainage system in Yuzhong district, China

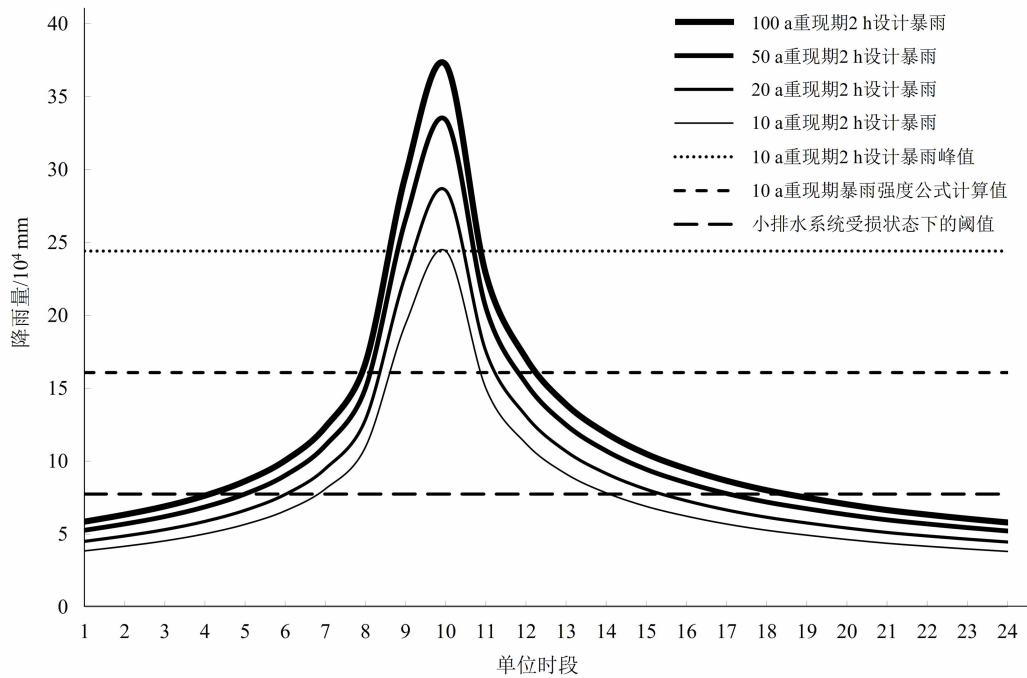


图6 渝中区四种重现期的2 h设计暴雨雨型及所选小排水系统受损阈值

Fig. 6 Design of 2-hour rainstorm patterns and selected small drainage system damage thresholds for four return periods in Yuzhong district, China

义两部分构成。本质上地表溢流传播是重力作用结果,地形上表征为地表溢流会从高处传播至低处。径流语义描述的便是现状大排水系统各构成要素在高差作用下形成的地表溢流传递关系。本文是以相同坡度的通道段或滞水地等要素作为节点,以节点平均高程作为节点高程值,以空间上相连接的节点间高差大小及方向作为有向边,构建现状大排水系统网络模型(图7a)。级联语义则描述地表溢流以现状大排水系统为基础,进行传播的过程。本文是以暴雨作为干扰源,以单位时段内各节点所具有的最大地表溢流量作为节点径流值,节点径流值会基于现状大排水系统网络模型传播,进而影响其他节点径流值。在面溢级联失效情景下,当某些节点径流值过载时,受节点间地表环境、高差关系与空间位置影响,大排水系统网络中可能会出现新的溢流传播关系,并形成新的有向边,以此构建大排水系统级联失效模型(图7b)。

级联语义模型是基于总量平衡、经验公式与径流概念过程等水文原理构建(图8)。总量平衡指径流在产汇、传播过程中总量不增减;经验公式指曼宁公式,用于计算大排水系统网络各节点的安全排蓄阈值,判断各节点是否存在溢流的流量条件,并结合

各节点间的地表环境、高差关系与空间位置,进一步判断各节点是否还存在溢流的空间条件;径流概念过程则是基于总量平衡与经验公式,对现实地表溢流传播过程的概化。节点 i 在 t 时段的径流排蓄状态可通过式(1)、式(2)与式(3)计算获取,计算公式如下:

$$S_{(t,i)} = \frac{Q_{(t,i)}}{V_i} \quad (1)$$

式中, $S_{(t,i)}$ 为节点 i 在 t 时段的径流排蓄状态, $S_{(t,i)}$ 在线溢与面溢情景下分别对应 $S_{L(t,i)}$ 与 $S_{F(t,i)}$ 。当 $0 \leq S_{(t,i)} \leq 1$ 时,表示节点 i 处于安全状态, $S_{L(t,i)} = S_{F(t,i)} = S_{(t,i)}$ 。当 $S_{(t,i)} \geq 1$ 时,表示节点处于过载状态,存在溢流的径流条件,线溢情景下, $S_{L(t,i)} = S_{(t,i)} \geq 1$,而面溢情景下,需进一步判断节点 i 是否存在溢流的空间条件,若存在, $S_{F(t,i)} = 1$,表示节点 i 处于过载溢流状态,溢流将沿新的溢流连边传递至对应节点;若不存在,则 $S_{F(t,i)} = S_{(t,i)} > 1$,表示节点 i 处于过载内涝状态。

$$V_i = (k/n) \cdot A_c \cdot R^{(2/3)} \cdot S^{(1/2)} \cdot t_s \quad (2)$$

式中, V_i 为曼宁公式变型,表示为节点 i 在单位时长 t_s (s)内的安全排蓄阈值($\text{m}^3/300\text{s}$); t_s 在本文中则为定值300 s,以匹配渝中区2 h设计暴雨雨型中的

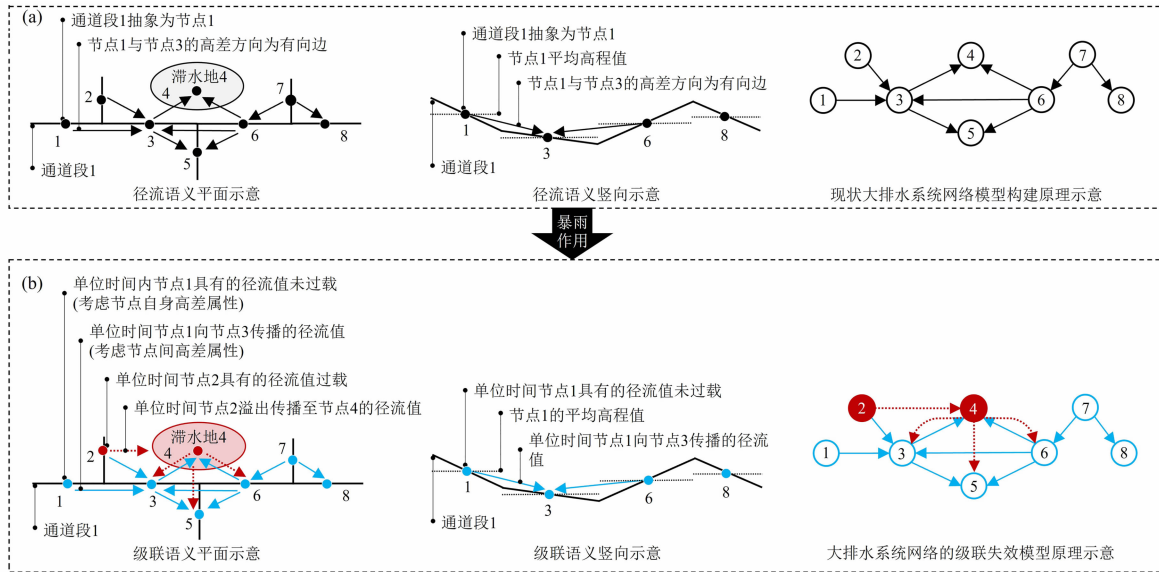


图7 大排水系统级联失效模型建模原理:(a)径流语义;(b)级联语义

Fig.7 Modeling principles of cascade failure models for major drainage systems: (a) runoff semantics; (b) cascading semantics

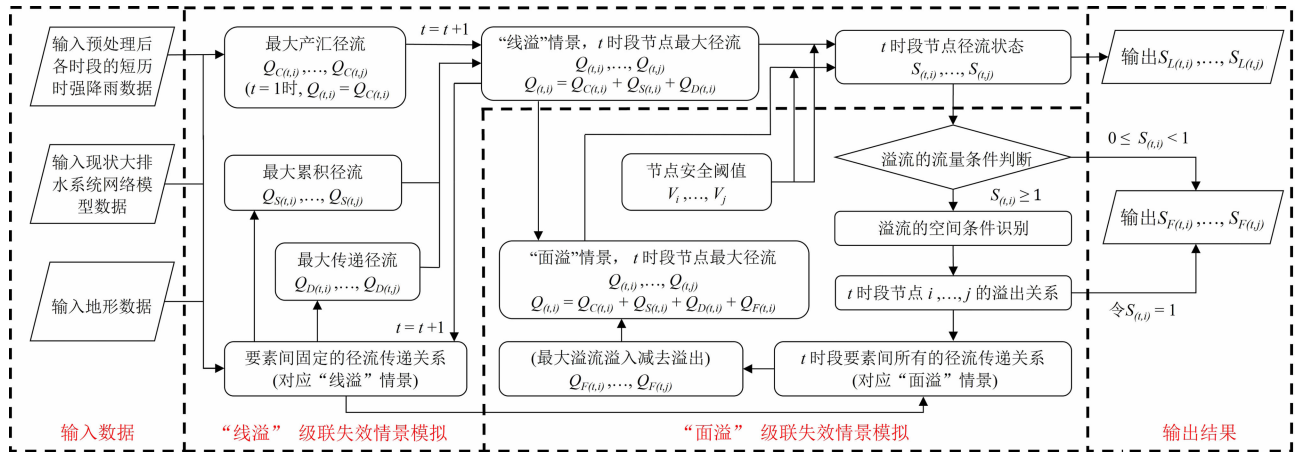


图8 级联语义模型

Fig.8 Cascading semantic models

时间划分标准,共划分为24个时段; k 为转换系数,国际标准取1; n 为粗糙系数; A_c 为过水断面面积(m^2), R 为水力半径(m),以防涝标准 $0.15 m^{[31]}$ 作为道路等物质要素的安全排蓄阈值的计算标准,自然通道等物质要素的安全排蓄阈值则基于实地调研、地理信息系统空间分析等方式获取,以此作为判断节点是否过载的依据; S 为节点自身的坡度。

$$Q_{(t,i)} = Q_{C(t,i)} + Q_{D(t,i)} + Q_{S(t,i)} + Q_{F(t,i)} \quad (3)$$

式中, $Q_{(t,i)}$ 为 t 时段节点 i 可能具有的最大径流值($m^3/300s$); $Q_{C(t,i)}$ 为 t 时段集水区内可能产汇于节点 i 的最大径流($m^3/300s$); $Q_{D(t,i)}$ 为 t 时段可能传输入到节点 i 的所有径流与节点 i 可能传出的所有径流的差值($m^3/300s$); $Q_{S(t,i)}$ 为节点 i 在 t 时段前可

能累积的最大径流($m^3/300s$); $Q_{F(t,i)}$ 为 t 时段可能溢入节点 i 的所有径流与节点 i 可能溢出的所有径流的差值($m^3/300s$),线溢级联失效情景下 $Q_{F(t,i)}$ 为0。

2.4 分析思路及原理

探索山地城市大排水系统级联失效机制,应围绕级联失效关键词,分析大排水系统级联失效时空过程、空间原理及基本规律。首先,通过模拟结果可分别得到线溢与面溢级联失效情景下,靶区大排水系统在所有时段中的模拟过载节点分布,将其与往年内涝区域对比,可验证方法的有效性,同时也能挖掘地表环境影响下的内涝空间分布差异;然后,通过模拟结果,可分别得到线溢与面溢两种级联失效情景下,靶区大排水系统在各个时段中的模拟过载节

点与新生成的溢流连边分布,借助系统过载率指标(式4)可量化模拟过载节点空间规模变化;接着,借助复杂网络协调性指标,即排蓄协调性(式5),可在整体上分析靶区大排水系统级联失效时空过程的空间原理;最后,在上述基础上,进一步挖掘山地城市局部地形与地表环境对大排水系统级联失效过程的影响,并提炼局部空间规律。

$$M_t = \frac{N_t}{N} \quad (4)$$

式中, M_t 为 t 时段大排水系统的系统过载率; N_t 为 t 时段大排水系统网络中过载节点数; N 为大排水系统网络总节点数。

$$C_t = \frac{\sum_{i \neq j}^n |S_{(t,i)} - S_{(t,j)}|}{N^2 - N} \quad (5)$$

式中, C_t 为 t 时段大排水系统的排蓄协调性,当 C_t 为 0 时,表示所有节点的径流排蓄状态相同,即完全协调,通常当 C_t 大于 0.5 时,可表示大排水系统内任意两节点间径流排蓄状态相差较大,可视为大排水系统排蓄状态很不协调。

3 结果与讨论

3.1 内涝区域的整体空间分布情况

模拟结果显示,靶区大排水系统在线溢(图 9a)与面溢(图 9b)两种级联失效情景下,所有时段的模拟过载节点空间分布一致。这表明在本文靶区,当地形、暴雨过程等自然条件以及大排水系统、小排水系统等人工条件稳定时,地表环境的开敞程度与内涝的发生区域不相关。

根据靶区往年内涝记录,对比常内涝的 25 个区域,发现除沿江易受过境洪水淹没的区域外,靶区内仍存在多处内涝区域。进一步将模拟过载节点与往年内涝区域对比,发现两者在空间分布上基本一致,靶区往年 25 处内涝区域中有 20 处与模拟结果极为接近,验证了模拟方法的有效性,表明靶区大排水系统级联失效的确是其内涝关键诱因之一。此外,模拟结果还显示靶区内仍存在多处潜在内涝区域(图 10)。

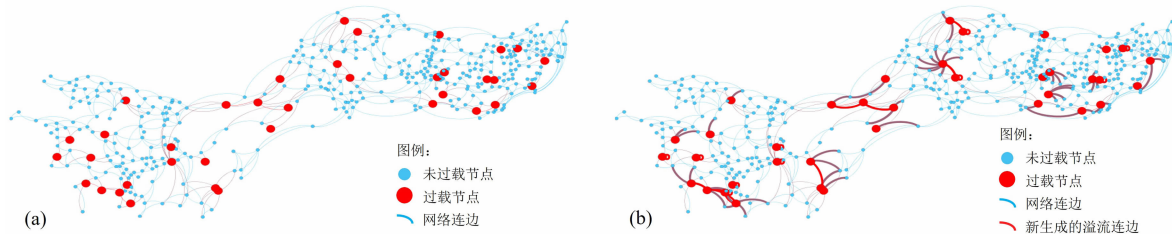


图9 大排水系统两种级联失效情景下所有时段模拟过载节点分布:(a)线溢;(b)面溢

Fig. 9 Cascade failure of major drainage system at all times in the target area: (a) line overflow; (b) surface overflow

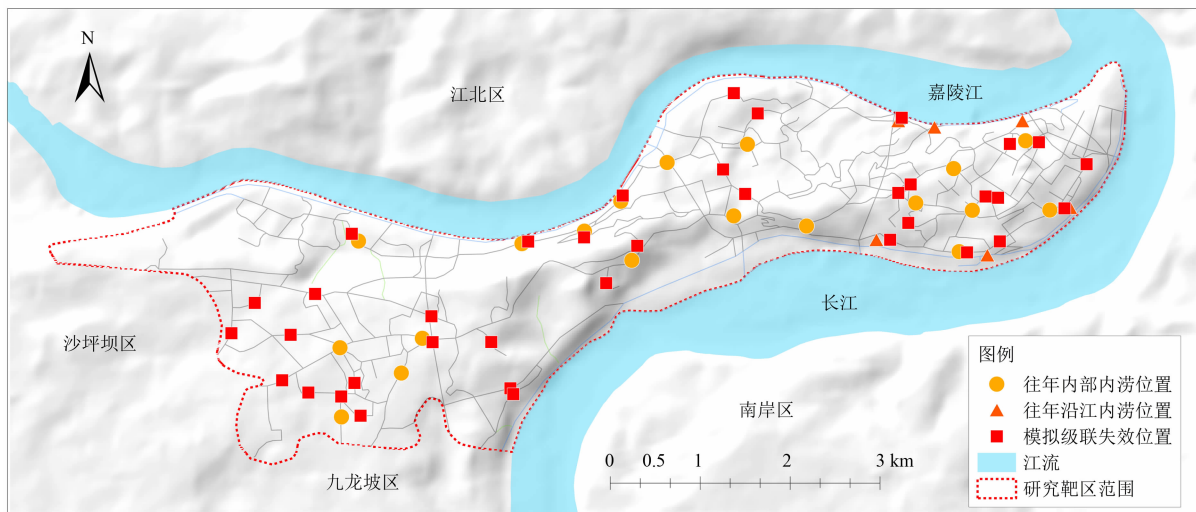


图10 大排水系统级联失效区域与往年内涝区域分布

Fig. 10 Distribution of cascade failure areas of major drainage systems and waterlogging areas in previous years

3.2 大排水系统级联失效时空过程

模拟结果显示,靶区大排水系统在线溢(图 11)与面溢(图 12)两种级联失效情景下,各个时段的模拟过载节点的空间分布有明显差异。同一时段,靶区大排水系统发生面溢级联失效时,模拟过载节点的空间规模明显更小。这表明在靶区内,当地形、暴雨过程等自然条件以及大排水系统、小排水系统等人工条件稳定时,地表环境的开敞程度虽与内涝的

发生区域不相关,但开敞的地表环境在促使靶区大排水系统发生面溢级联失效的同时,会有助于降低大排水系统的过载程度(图 13),减少内涝持续时间,加快内涝过程恢复。

3.3 级联失效时空过程的空间原理

根据排蓄协调度计算结果分析,20 a、50 a 与 100 a 三种重现期暴雨下,靶区大排水系统在线溢情景下的最大排蓄协调度数值分别为 0.28、0.51、0.

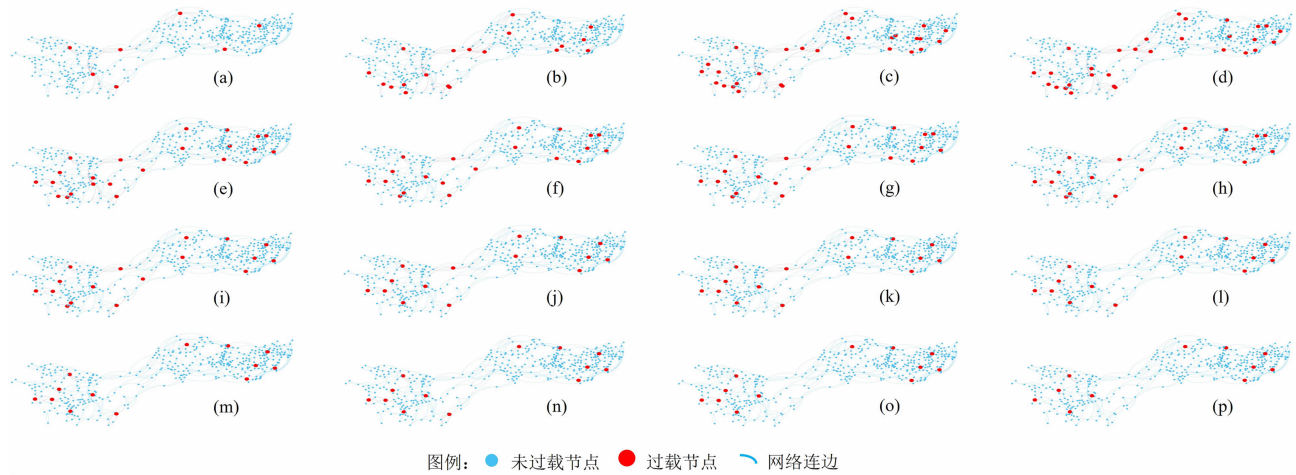


图 11 靶区各个时段大排水系统线溢级联失效情况(100 a 重现期为例):

(a)9 时段;(b) 10 时段;(c)11 时段;(d)12 时段;(e)13 时段;(f)14 时段;(g)15 时段;(h)16 时段;

(i)17 时段;(j)18 时段;(k)19 时段;(l)20 时段;(m)21 时段;(n) 22 时段;(o) 23 时段;(p) 24 时段

Fig. 11 Major drainage system line overflow cascade failure situation in each time interval of the target area (return period of 100

years as an example): (a) the 9th; (b) the 10th; (c) the 11th; (d) the 12th; (e) the 13th; (f) the 14th; (g) the 15th;

(h) the 16th; (i) the 17th; (j) the 18th; (k) the 19th; (l) the 20th; (m) the 21st; (n) the 22nd; (o) the 23rd; (p) the 24th

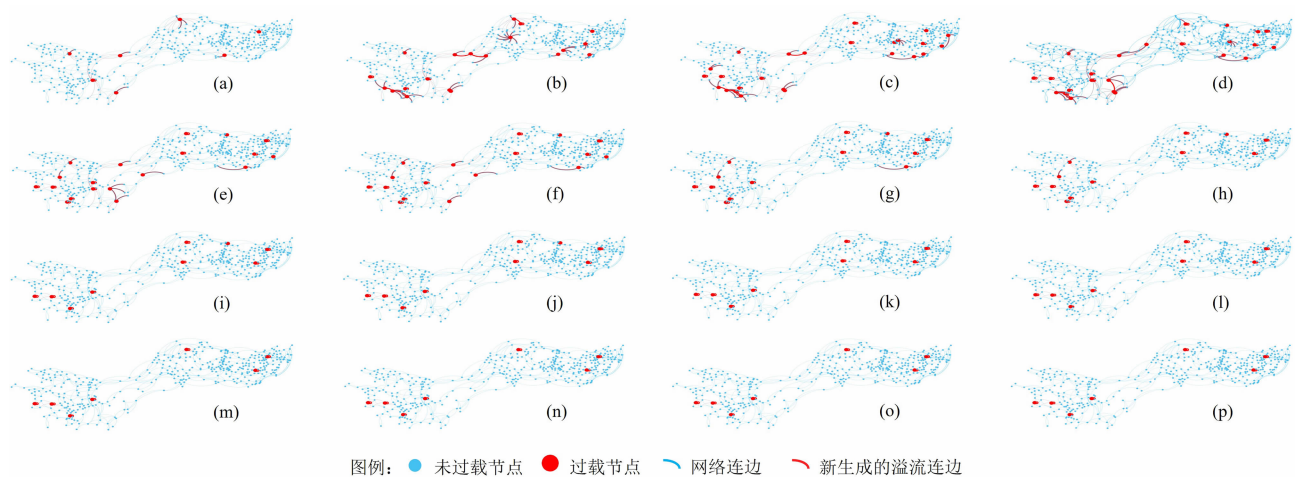


图 12 靶区各个时段大排水系统面溢级联失效情况(100 a 重现期为例):

(a)9 时段;(b) 10 时段;(c)11 时段;(d)12 时段;(e)13 时段;(f)14 时段;(g)15 时段;(h)16 时段;

(i)17 时段;(j)18 时段;(k)19 时段;(l)20 时段;(m)21 时段;(n) 22 时段;(o) 23 时段;(p) 24 时段

Fig. 12 Major drainage system surface overflow cascade failure situation in each time interval of the target area (return period of 100

years as an example): (a) the 9th; (b) the 10th; (c) the 11th; (d) the 12th; (e) the 13th; (f) the 14th; (g) the 15th;

(h) the 16th; (i) the 17th; (j) the 18th; (k) the 19th; (l) the 20th; (m) the 21st; (n) the 22nd; (o) the 23rd; (p) the 24th

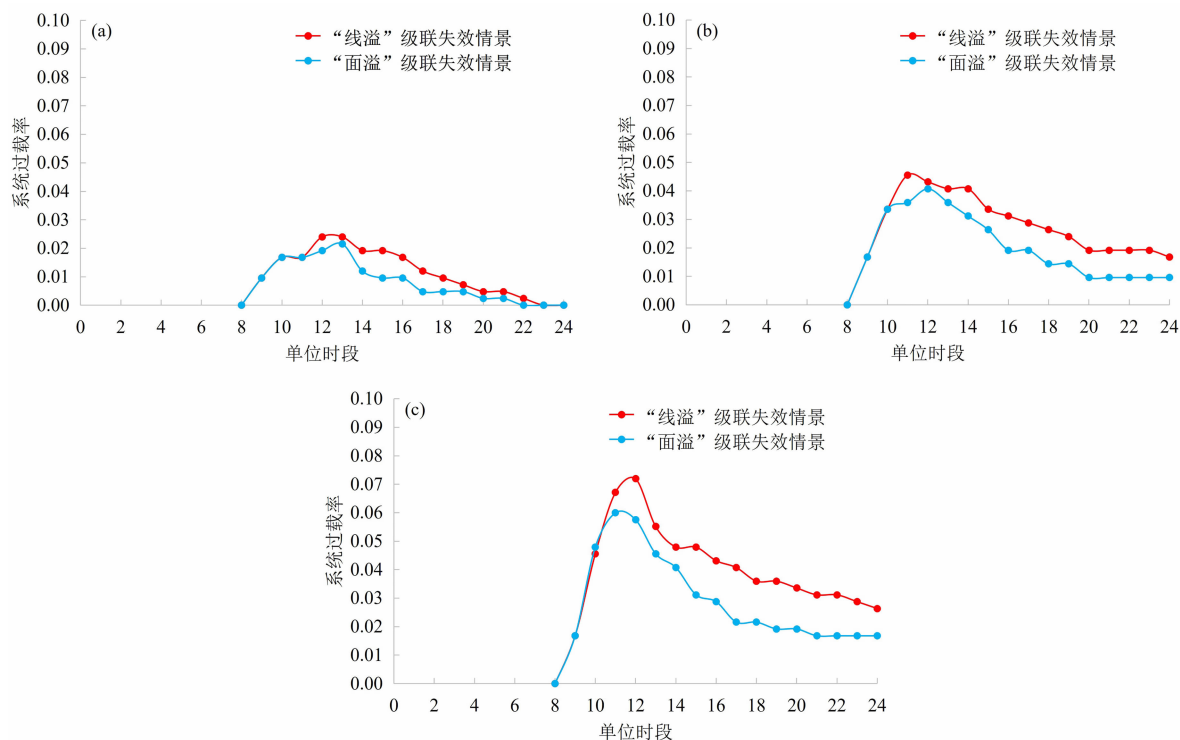


图 13 靶区不同重现期暴雨影响下的系统过载率指标变化:(a)20 a 重现期;(b)50 a 重现期;(c) 100 a 重现期

Fig. 13 Index changes of system overload rate under the influence of rainstorm with different regeneration periods in the target area: (a) return period of 20 years; (b) return period of 50 years; (c) return period of 100 years

73,均较大,表明靶区地形虽能加快地表溢流排蓄,但也会使地表溢流快速集聚至部分相对低洼的大排水系统要素上,加剧这些要素的排蓄压力,引发这些要素过载,并发生级联失效。同时,暴雨重现期减小,明显加剧了这种过程,导致靶区大排水系统过载要素明显增多,级联失效程度加剧。而靶区大排水系统在面溢情景下的最大排蓄协调度数值分别为0.16、0.23、0.29,远低于线溢情景,说明开敞的地表环境能够增加地表溢流的传播途径,过载要素内集聚的地表溢流更易分流至周边要素,协同周边要素排涝。分流虽改变了地表溢流的传播过程,加大了大排水系统的面溢级联程度,但同时也缓解了过载要素的排蓄压力,减缓了内涝持续时间及发生程度(图 14)。

综上,靶区地形会使地表溢流明显集中在其大排水系统的部分要素中,导致这类要素更易过载,发生级联失效;单位时间雨量增大,会加剧靶区地形下的地表溢流不均衡分布趋势,引发级联失效加剧;相反,开敞的地表环境则会加大地表溢流的空间分流程度,降低靶区地形下的地表溢流不均衡分布趋势,

并表现出有助于靶区大排水系统过载要素的恢复。故合理利用渝中区地形对地表溢流分布的影响趋势,来组织优化大排水系统的主体网络结构,同时评估大排水系统能够应对的极端暴雨量,是引导地表溢流安全排蓄的基础。

3.4 级联失效的局部空间分流规律

靶区地形与开敞地表环境的综合影响虽整体表现出利于排涝防涝,但靶区内部地形仍存在差异,这使得开敞的地表环境对靶区大排水系统级联失效时空过程及结果的影响在局部也表现出了差异。

研究总结发现四种内部空间分流规律:(1)低洼地形下,过载要素溢流在线溢与面溢情景下都无法进行空间分流,只能集聚引发局部内涝,由此产生内涝型规律(图 15a);(2)陡坡或沟谷地形下,过载要素溢流量大,在线溢与面溢两种情景下都会沿通道快速传播,面溢情景下溢流还能在短时间内直接从前端过载要素溢出至后端要素,引发后端要素快速过载,加快行洪过程,且易中断交通与用地功能,对车辆及行人造成冲击,由此产生行洪型规律(图 15b);(3)平缓地形下,要素排蓄能力通常较小,过

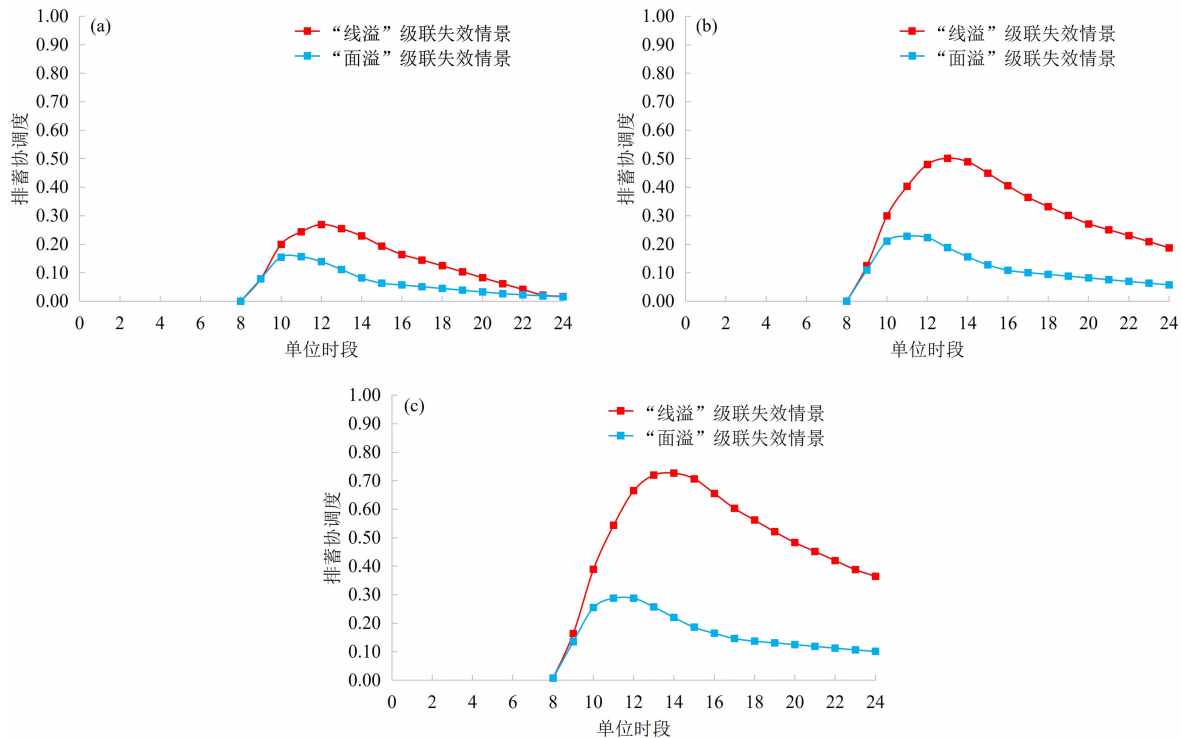


图 14 靶区不同重现期暴雨影响下的排蓄协调度指标变化:(a)20 a 重现期;(b)50 a 重现期;(c) 100 a 重现期
Fig. 14 Index changes of discharge and storage cooperation indicators under the influence of rainstorm with different return periods in the target area: (a) return period of 20 years; (b) return period of 50 years; (c) return period of 100 years

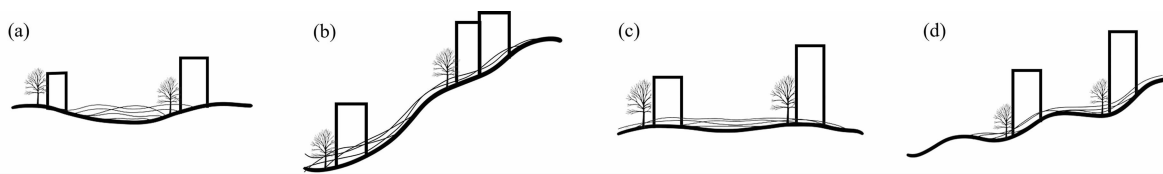


图 15 山地城市大排水系统级联失效过程中的局部空间分流规律:
(a) 受低洼地形影响;(b) 受陡坡或沟谷地形影响;(c) 受平缓地形影响;(d) 受山地起伏地形影响
Fig. 15 Local spatial diversion law during cascade failure of major drainage system in mountain cities:
(a) affected by low-lying topography; (b) affected by the topography of steep slopes or ravines;
(c) affected by gentle terrain; (d) influenced by mountainous undulating terrain

载要素溢流在线溢与面溢两种情景下都容易排蓄不及,尤其面溢情景下极易引起周边相邻或地势较低的要素发生过载溢流,引发多次面溢,导致内涝蔓延,由此产生蔓延型规律,但此种规律在山地城市较少(图 15c);(4)山地起伏地形下,在面溢情景下过载要素溢流后,会引起自身和后端要素内的径流量减小,帮助恢复。同时溢流量通常不会超出周边相邻或地势较低的要素的排蓄能力,很少引起多次面溢,由此产生缓解型规律(图 15d)。相较于其他三种形式,靶区缓解型明显多于前三者之和,这种通过面溢方式分流,同时控制地表溢流蔓延的内部空间

分流规律,与诸多雨洪管理理念中的疏导、缓解不谋而合,也是靶区大排水系统面溢级联失效会表现出进一步提升排涝防涝能力的关键原理所在。

综上,开敞的地表环境并非在所有地形下都表现出利于排涝防涝,如低洼地形下,地表环境开敞与否对过载要素并没有特别明显的影响,只有当汇聚于此的地表溢流被提前分流后,此类要素的过载程度才有所降低;如陡坡、平缓地形下,地表环境过于开敞反而易造成大排水系统级联失效程度加剧,引起内涝蔓延;而山地起伏地形下,开敞的地表环境则表现出有利于地表溢流排蓄,降低大排水系统级联

失效程度。故在渝中区大排水系统主体网络结构基础上,合理利用局部地形来优化大排水系统的局部连通性、增设一些滞蓄性要素以及控制局部地表环境,均能进一步引导地表溢流合理汇聚、分流排蓄,提升大排水系统排涝防涝能力。

3.5 讨论

上述结果表明地形仍在很大程度上主导着城市大排水系统的排蓄格局,暴雨与地表环境则是在地形基础上,进一步干扰大排水系统排蓄格局的重要因素。当地形、暴雨与地表环境等因素变化时,大排水系统级联失效会随之发生不同程度改变,引起内涝变化。这揭示了山地城市大排水系统级联失效机制的关键原理及规律。

相对于已有研究^[9,26],本研究聚焦于当前城市防洪排涝体系中的薄弱环节,即大排水系统,通过量化分析进一步明确了渝中区这类山地城市的地形、暴雨及地表环境等不确定性因素对其大排水系统级联失效的综合影响趋势,为系统性理解山地城市内涝,指导山地城市大排水系统构建,提升山地城市排涝防涝能力奠定了基础。

本研究的方法及结果可在今后进一步拓展至更多类型山地城市的大排水系统研究中。后续将进一步结合流域洪水与城市内涝等综合场景,细化不同类型的不确定性因素,构建更综合的理论模型;选择流域靶区,分析总结多类型山地地形、暴雨时长、暴雨雨型、小排水系统故障状态下的大排水系统级联失效机制,并在多时空尺度下,探讨不同类型山地城市大排水系统级联失效机制的应用。

4 结论

本研究以重庆市渝中区为靶区,采用复杂网络分析方法构建了大排水系统级联失效模型,分析总结了山地城市大排水系统级联失效机制,发现地形、暴雨及地表环境均会影响地表溢流传播,改变大排水系统级联失效过程,导致内涝过程多变。主要结论如下:

(1) 渝中区模拟大排水系统级联失效区域与往年内涝区域基本一致,表明渝中区大排水系统级联失效是其内涝的关键诱因之一。

(2) 当地形、暴雨、小排水系统等因素稳定时,

渝中区地表环境的开敞程度与内涝发生区域并不相关,但开敞的地表环境会促使大排水系统发生面溢级联失效,有助于降低大排水系统的过载程度,同时减少内涝持续时间,加快内涝过程恢复。

(3) 地表溢流在渝中区山地地形下会更易集聚在大排水系统部分物质构成要素中,暴雨增大会加剧这种集聚趋势。反之,开敞的地表环境则会加大地表溢流的空间分流程度,以此减小这种集聚趋势。

(4) 渝中区内仍有小范围低洼或平坦地形,地表溢流极易在此类区域集聚或蔓延,而渝中区内大范围的山地起伏地形在加快地表溢流排蓄的同时,能控制地表溢流蔓延,这也是渝中区大排水系统面溢级联失效可以提升其排涝防涝能力的关键空间原理。

参考文献 (References)

- [1] 赵丰昌, 章林伟, 高伟. 海绵城市理念下城市内涝防治体系构建的探讨[J]. 给水排水, 2021, **47**(8): 37-44. [ZHAO Fengchang, ZHANG Linwei, GAO Wei. Discussion on the construction of urban flooding control system under the concept of sponge city [J]. Water and Wastewater Engineering, 2021, **47**(8): 37-44] DOI: 10.13789/j.cnki.ww1964.2021.08.007
- [2] 徐耀阳, 李刚, 崔胜辉, 等. 韧性科学的回顾与展望: 从生态理论到城市实践[J]. 生态学报, 2018, **38**(15): 5297-5304. [XU Yaoyang, LI Gang, CUI Shenghui, et al. Review and prospect on resilience science: From ecological theory to urban practice [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(15): 5297-5304] DOI: 10.5846/stxb201709081620
- [3] MOGES E, DEMISSIE Y, LARSEN L, et al. Review: Sources of hydrological model uncertainties and advances in their analysis [J]. Water, 2020, **13**(1): 28-28. DOI: 10.3390/w13010028
- [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] DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.04.001
- [5] BERTILSSON L, WIKLUND K, DE MOURA TEBALDI I, et al. Urban flood resilience: A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning [J]. Journal of Hydrology, 2019, **573**: 970-982. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.052
- [6] 王晶, 赵龙, 吴辉, 等. 西南地区城市化进程加剧局地气象条件的空间差异[J]. 山地学报, 2022, **40**(1): 120-135. [WANG Jing, ZHAO Long, WU Hui, et al. Urbanization magnifies spatial variations of local meteorological conditions in southwest

- China [J]. Mountain Research, 2022, **40**(1): 120 – 135] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000660
- [7] WANG Weiping, YANG Saini, STANLEY H E, et al. Local floods induce large-scale abrupt failures of road networks [J]. Nature Communications, 2019, **10**(1): 1 – 11. DOI: 10.1038/s41467-019-10063-w
- [8] U. S. Department of Transportation. Urban drainage design manual (third edition) [M]. Washington: Washington Hydraulics Engineering Publication, 2009: 2 – 9.
- [9] 车伍, 杨正, 赵杨, 等. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(16): 13 – 19. [CHE Wu, YANG Zheng, ZHAO Yang, et al. Analysis of urban flooding control and major and minor drainage systems in China [J]. China Water and Wastewater, 2013, **29**(16): 13 – 19] DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2013.16.004
- [10] 黄华兵, 王先伟, 柳林. 城市暴雨内涝综述: 特征、机理、数据与方法[J]. 地理科学进展, 2021, **40**(6): 1048 – 1059. [HUANG Huabing, WANG Xianwei, LIU Lin. A review on urban pluvial floods: Characteristics, mechanisms, data and research methods [J]. Progress in Geography, 2021, **40**(6): 1048 – 1059] DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.06.014
- [11] MCCLYMONT K, CUNHA D G F, MAIDMENT C, et al. Towards urban resilience through Sustainable Drainage Systems: A multi-objective optimisation problem [J]. Journal of Environmental Management, 2020, **275**: 111173. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111173
- [12] DONG Xin, GUO Hao, ZENG Siyu. Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure [J]. Water Research, 2017, **124**: 280 – 289. DOI: 10.1016/j.waters.2017.07.038
- [13] 徐雷, 吴正松, 邵知宇, 等. 基于 SWMM 耦合模型的道路行泄通道设计方法与应用[J]. 中国给水排水, 2021, **37**(1): 114 – 120. [XU Lei, WU Zhengsong, SHAO Zhiyu, et al. Design method and application of roadway drainage path based on coupled hydraulic SWMM model [J]. China Water and Wastewater, 2021, **37**(1): 114 – 120] DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.01.019
- [14] GRAF W L. Network characteristics in suburbanizing streams [J]. Water Resources Research, 1977, **13**(2): 459 – 463.
- [15] BANNISTER E N. Impact of road networks on southeastern Michigan lakeshore drainage [J]. Water Resources Research, 1979, **15**(6): 1515 – 1520.
- [16] 夏军, 张印, 梁昌梅, 等. 城市雨洪模型研究综述[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, **51**(2): 95 – 105. [XIA Jun, ZHANG Yin, LIANG Changmei, et al. Review on urban storm water models [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, **51**(2): 95 – 105] DOI: 10.14188/j.1671-8844.2018-02-001
- [17] 康宏志, 郭祺忠, 练继建, 等. 海绵城市建设全生命周期效果模拟模型研究进展[J]. 水力发电学报, 2017, **36**(11): 82 – 93. [KANG Hongzhi, GUO Qizhong, LIAN Jijian, et al. Advances in simulation models for whole-life-cycle effectiveness of sponge city construction [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, **36**(11): 82 – 93] DOI: 10.11660/sldxb.20171109
- [18] 桂晗亮, 张春萍, 武治国, 等. 人工神经网络和 SWMM 在降雨径流模拟中的应用对比[J]. 中国给水排水, 2021, **37**(13): 108 – 112. [GUI Hanliang, ZHANG Chunping, WU Zhiguo, et al. Application of artificial neural network and SWMM applied in rainfall runoff simulation [J]. China Water and Wastewater, 2021, **37**(13): 108 – 112] DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.13.019
- [19] BOCCALETTI S, BIANCONI G, CRIADO R, et al. The structure and dynamics of multilayer networks [J]. Physics Reports, 2014, **544**(1): 1 – 122. DOI: 10.1016/j.physrep.2014.07.001
- [20] MOTTER A E, LAI Yingcheng. Cascade-based attacks on complex networks [J]. Physical Review E, 2002, **66**(6): 065102(R). DOI: 10.1103/PhysRevE.66.065102
- [21] BAKHSHIPOUR A E, DITTMER U, HAGHIGHI A, et al. Toward sustainable urban drainage infrastructure planning: A combined multiobjective optimization and multicriteria decision-making platform [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2021, **147**(8): 04021049. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001389
- [22] DONG Shangjia, WANG Haizhong, MOSTAFIZI A, et al. A network-of-networks percolation analysis of cascading failures in spatially co-located road-sewer infrastructure networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, **538**: 122971. DOI: 10.1016/j.physa.2019.122971
- [23] 黄勇, 魏猛, 万丹, 等. 西南山地多灾区域道路网络可靠性规律分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, **48**(4): 526 – 535. [HUANG Yong, WEI Meng, WAN Dan, et al. Analysis of reliability of road network in mountainous disaster-prone areas in southwest China [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, **48**(4): 526 – 535] DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.18476
- [24] MUKHERJEE S, MISHRA A K. Cascading effect of meteorological forcing on extreme precipitation events: Role of atmospheric rivers in southeastern US [J]. Journal of Hydrology, 2021, **601**: 126641. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126641
- [25] 车伍, 马震, 王思思, 等. 中国城市规划体系中的雨洪控制利用专项规划[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(2): 8 – 12. [CHE Wu, MA Zhen, WANG Sisi, et al. Special planning for stormwater management and utilization in Chinese urban planning system [J]. China Water and Wastewater, 2013, **29**(2): 8 – 12]
- [26] 谢映霞. 从城市内涝灾害频发看排水规划的发展趋势[J]. 城市规划, 2013, **37**(2): 45 – 50. [XIE Yingxia. Development of

- drainage planning in view of frequent urban waterlogging disasters [J]. Urban Planning Journal, 2013, **37**(2): 45–50]
- [27] 王瑛, 刘天雪, 李体上, 等. 中国中小型自然灾害的空间格局研究——以地震、洪涝、旱灾为例[J]. 自然灾害学报, 2017, **26**(4): 48–55. [WANG Ying, LIU Tianxue, LI Tishang, et al. Study on spatial pattern of small and medium sized natural disasters in China: A case of earthquake, flood and drought [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, **26**(4): 48–55] DOI: 10.13577/j.jnd.2017.0406
- [28] 熊俊楠, 李进, 程维明, 等. 西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素[J]. 地理学报, 2019, **74**(7): 1374–1391. [XIONG Junnan, LI Jin, CHENG Weiming, et al. Spatial-temporal distribution and influencing factors of mountain flood disaster in southwest China [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(7): 1374–1391] DOI: 10.11821/dlxb201907008
- [29] 周剑, 汤明高, 许强, 等. 重庆市滑坡降雨阈值预警模型[J]. 山地学报, 2022, **40**(6): 847–858. [ZHOU Jian, TANG Minggao, XU Qiang, et al. Early warning model of rainfall-induced landslide in Chongqing of China based on rainfall threshold [J]. Mountain Research, 2022, **40**(6): 847–858] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000718
- [30] 钟敦伦, 谢洪, 韦方强, 等. 论山地灾害链[J]. 山地学报, 2013, **31**(3): 314–326. [ZHONG Dunlun, XIE Hong, WEI Fangqiang, et al. Discussion on mountain hazards chain [J]. Mountain Research, 2013, **31**(3): 314–326] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2013.03.019
- [31] GB50014—2021. 室外排水设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021. [GB50014—2021. Standard for design of outdoor wastewater engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 2021]

Cascading Failure Mechanism of Major Rainwater Drainage System in Mountainous City: A Case Study of Yuzhong District of Chongqing, China

HUANG Yong¹, SUN Ao¹, ZHU Zhizheng¹, XIANG Hengling²

(1. School of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. General Research Institute of Architectural & Planning and Design Co., Ltd., Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Major drainage system is a rainwater drainage system in a city designed to extra-excessive runoff diversion composed of roads, natural passages, open channels, ponded rainwater (standing water or stagnant water) sites and storage facilities, etc. Due to the openness role of rainwater collecting and discharging process, the major drainage system is subjected to cascading aftermath, such as uncontrolled overflow, traffic interruption or inundation in urban land, which contribute to urban waterlogging. There was a lack of research on quantitative analysis of major urban drainage system, especially for its cascading failure mechanism in mountain cities.

In this study, it took Yuzhong district of Chongqing, China as a case study to investigate the pattern of urban surface flow in a mountainous city and the inherent cascading failure mechanism of its major drainage system; it used complex network analysis method to build a cascading failure model to simulate mal-functionality of the major drainage system in the event of extreme rainstorm.

The results include: (1) The full extent of cascading failure in Yuzhong delineated by simulation was generally consistent with the waterlogging areas observed in previous years; (2) As other uncertain factors were unchanged, the open ground environment was able to reduce the function overloading of the major drainage system and slow down the duration of local inundation and occurrence extent; the open level of the ground environment was not correlated with the occurrence sites of waterlogging; (3) Surface overflow in certain terrains was more likely to be drained shortly into the element structures of the major drainage system, particularly more in the case of

intensified rainstorms; however, the open ground environment restricted this centralized drainage trend as a result of spatial diversion of surface flow; (4) A small range of depression and flat terrain in the city made surface overflow flowable to ponding or ramifying, while a large range of undulating terrain speeded up the surface overflow into drainage storage and impeded it in wandering.

This research provides a scientific basis for planning of major drainage system in mountain cities, as well as drainage capacity refurbishing and waterlogging preventing.

Key words: mountainous city; waterlogging; major drainage system; cascading failure; overflow propagation; Chongqing

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)