

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.11.019

不同拓扑结构雨水管网对系统承涝韧性的影响

魏瑛侠¹, 邱顺添¹, 刘洋², 王明娜²

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350)

摘要: 由于城市化进程加快和气候变化,城市雨水管网系统的性能受到巨大影响,导致城市内涝频发。拓扑结构作为雨水管网系统的基本特征之一,其变化会对系统性能产生一定影响,韧性是评价雨水管网系统性能的一个指标,目前关于不同拓扑结构对系统承涝韧性的影响尚不明确。为此,以深圳坪山某研究区域为例,通过构建SWMM模型,结合图论和拓扑结构分析方法定量表述雨水管网特征,确定关键节点的位置和系统网格度,以进行影响分析并进一步探究优化管网拓扑结构的方法。结果表明,新增管道引入环路可完成管网的升级改造,以提高系统韧性;在综合中心性高(I3)的节点处新增管道能最大程度地提升管网系统的韧性,同时在I3类中网格度从10%提升至20%,系统韧性的提升率可达到6.57%。

关键词: 雨水管网; 拓扑结构; 韧性; 内涝; SWMM

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)11-0129-08

Impact of Topological Structure on Waterlogging Resilience of Storm Sewer Network

WEI Ying-xia¹, KHU Soonthiam¹, LIU Yang², WANG Ming-na²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The performance of urban storm sewer network system has been significantly impacted by the acceleration of urbanization and climate change, leading to frequent urban waterlogging. The topological structure is a fundamental characteristic of storm sewer network system, and any changes to it will inevitably impact the system's performance. Resilience serves as an important indicator for evaluating the performance of the storm sewer network system. Currently, the impact of different topological structures on the system's waterlogging resilience remains unclear. This paper quantitatively expressed the storm sewer network characteristics in Pingshan, Shenzhen by utilizing SWMM, graph theory and topological structure analysis methods, and determined the key node locations and system grid degree, so as to analyze the impact and further explore the methods for optimizing pipe network topology. Introducing the loop by adding new pipelines realized the upgrading of the pipe network, thereby improving the system's resilience. The addition of pipelines at nodes with high comprehensive centrality (I3) maximized the resilience of the storm sewer network system. In class I3, the grid degree was increased from 10% to

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001400)

通信作者: 王明娜 E-mail: mingna.wang@tju.edu.cn

20%, resulting in a 6.57% improvement in the system's resilience.

Key words: storm sewer network; topological structure; resilience; waterlogging; SWMM

城市现有的雨水系统正遭遇愈加严重的多种威胁,比如极端降雨增多、城市化程度剧增等,不仅会带来严重的洪涝灾害,还可能导致居民生活受阻和经济财产的损失。随着极端降雨出现频率加快,雨水系统的正常排水能力受阻,因此亟需对系统进行升级改造,使其在超标降雨下也能保持良好的系统性能和韧性。

韧性反映了雨水管网系统的抵抗、吸收、恢复能力,表示“反弹”和“恢复到原始状态”^[1]。近年来,韧性的概念被逐渐应用到内涝灾害防治工作中,目前针对排水系统韧性的研究,多集中于极端降雨、城市化剧增等对雨水管网的影响^[2-3],而对于雨水管网的结构变化影响研究较少。雨水管网的拓扑结构、管径、管道坡度、管道数量等对整个雨水系统的承涝韧性都有不同程度的影响。Zhang等^[4]通过脆弱性指数来衡量排水系统改造前后的脆弱性,发现树状系统的脆弱性远大于环状系统,揭示了两者的脆弱性差异;Lu等^[5]对比了雨水管网拓扑结构转换前后系统的水文响应,发现环状排水管网能够减少出水口的峰值流量,有助于降低洪涝风险。

韧性是衡量城市雨水管网系统性能的一个重要指标。通过增加管道来引入环路是增加管道冗余性、提升系统韧性的一个重要措施。Hesarkazzazi等^[6]发现在下游增加管道可以加速雨水的排出,但是增加管道引入环路的程度对系统韧性的影响尚不明晰,新增管道位置也未明确指出。实际上,雨水管网系统可以简化成一个具备点和线的图,通过分析其拓扑结构可对其特征进行准确性表达^[7-8]。鉴于此,笔者为探究雨水管网系统中拓扑结构这一关键影响因素对系统承涝韧性的影响,基于SWMM并结合图论相关概念,分析了不同拓扑结构布局对雨水管网系统承涝韧性的提升效果,定位雨水管网系统中的关键节点位置,并量化描述新增管道引入环路这一措施对内涝的缓解效果。

1 研究方法

本研究基于不同拓扑结构下的雨水管网内涝过程模拟结果,进行系统承涝韧性影响分析,涉及的方法有拓扑结构分析方法、韧性分析方法等。

1.1 韧性分析方法

Mugume等^[9]提出用韧性值将系统的功能损失与剩余性能联系起来。韧性值的取值范围是0~1,其中0表示雨水系统的最低承涝韧性水平,1表示雨水系统的最高承涝韧性水平。

特定极端降雨事件下雨水系统的性能曲线如图1所示^[10]。 P_i 代表系统的原始性能水平,黑色曲线表示实际系统性能变化;在一次极端降雨事件后,系统性能达到最小值 P_t ,之后逐渐恢复至 t_{fe} 时刻的初始水平; P_a 代表系统能接受的最低损害水平,即最低韧性阈值。内涝严重度是整个过程中系统损害程度的总和,即图1中的阴影区域。

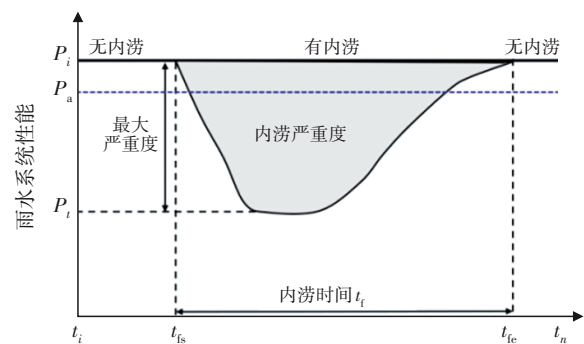


图1 雨水系统性能变化曲线

Fig.1 Rainwater system performance variation curve

为确保计算的合理性和评估基准的统一性,本研究采用Wang等^[10]提出的基准韧性分析方法进行雨水管网系统的韧性值计算。

$$t_{VN} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N_{\text{do-nothing}}} \quad (1)$$

$$\text{Res}_f = 1 - \text{Sev}_f = 1 - \frac{V_{\text{TF}}}{V_{\text{TI}}} \times \frac{t_{VN}}{t_n} \quad (2)$$

式中: $N_{\text{do-nothing}}$ 为基图(现状雨水管网系统)下内涝(积水深度 $\geq 15\text{cm}$)节点总数,个; $\sum_{i=1}^n t_i$ 为给定方案下对所有节点求和得到的内涝总持续时间,h; t_{VN} 为基图下节点平均溢流时间,如果系统没有内涝,则 t_{VN} 为0,h; Res_f 为系统的承涝韧性值; Sev_f 为内涝严重度; V_{TF} 为总溢流量, 10^6L ; V_{TI} 为总入流量, 10^6L ; t_n 为总模拟时间,考虑退水时间,故取值为8h。

1.2 拓扑结构分析方法

在图论中,有向图被表述为一个与 E 和 V 相关的二维数组 $G=(E,V)$ 。其中点(V),通常代表检查井,是管道之间的连接;边(E),通常代表连接节点之间有一定方向的管道^[8]。中心性是判定网络中节点重要性的指标,是节点重要性的量化表现,包括4种类型,分别是点度中心性、紧密中心性、中介中心性、特征向量中心性。通过计算中心性可确定雨水管网系统中的关键节点。本研究采用中介中心性和紧密中心性两个指标分别赋予权重后得到的综合中心性来衡量节点的重要程度。

$$C_B(v) = \sum_{s \neq t \neq v \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \tag{3}$$

$$C_C(v) = \frac{1}{\sum_{t \in G} d_G(v,t)} \tag{4}$$

$$I = w_1 \times C_B(v) + w_2 \times C_C(v) \tag{5}$$

式中: $C_B(v)$ 为中介中心性; $C_C(v)$ 为紧密中心性; I 为节点综合中心性; w_1 和 w_2 为权重值,参考Lu等^[8]的取值, $w_1=0.2$ 、 $w_2=0.8$ 。

为进一步度量雨水管网系统中新增管道引入环路的程度,引入网格度这一评价指标,它是基于系统内节点总度,即除排出口外连接到节点的管道数量之和,进行计算推断。考虑到地形、建筑物空间位置、施工限制等因素的影响,本研究假设每个节点最多只有4个管道可连接,且节点之间具备能够相连的空间位置构成环路。网格度=0%代表系统具备最少的管道数量;网格度=100%代表系统内所有节点在上述假设条件下具备最多的环路,连通性最强,见图2。与之对应的雨水管网特征值见表1。假设系统网格度与节点总度呈线性相关,则任意一种拓扑结构的雨水管网都能推算出网格度。

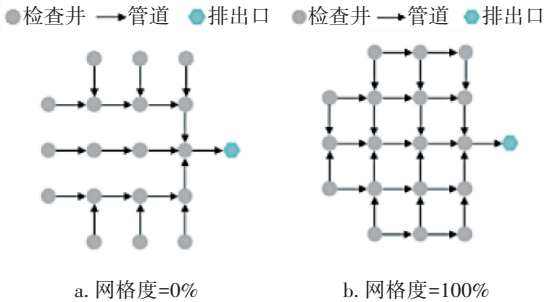


图2 简化雨水管网示例

Fig.2 Example diagram of a simplified storm sewer network

表1 雨水管网示例的特征值

Tab.1 Characteristic values for storm sewer network example

情景	节点总度	节点总数/个	网格度/%
无环	35	18	0
全环	55	18	100

1.3 不同拓扑结构布局的雨水管网构建

首先筛选节点总度=4的节点;然后将中心性通过式(5)加权计算后得到的综合中心性按照大小排序,并均分为3类:低(I1)、中(I2)、高(I3),综合中心性的值越高代表节点的重要程度越高;基于现状雨水管网通过新增管道自主构造全环网络,并定义现状雨水管网网格度为0%,全环雨水管网网格度为100%,以此来进一步构建不同网格度的雨水管网;分别在3类节点处新增管道,引入环路,以构建不同拓扑结构布局的雨水管网系统,具体构建方法如图3所示。

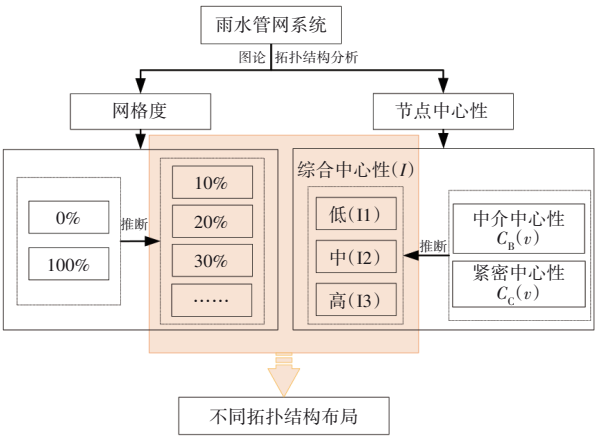


图3 不同拓扑结构布局的雨水管网系统构建方法

Fig.3 Building diagram of storm sewer network system with different topologies layout

2 内涝模型构建与拓扑结构分析

2.1 研究区域概况

研究区域位于深圳市坪山区,是坪山河流域的一个排水分区,总面积为4.13 km²,排水体制为雨污分流制,区域降雨通过雨水管网从东侧雨水主管排入坪山河,地势西高东低。

研究区域以工业用地和建筑用地为主,不透水区面积约占总面积的85%,其余为绿化用地等,具体的土地利用类型如图4所示。概化后模型内有检查井368个、排出口1个、管道368根,管道总长度为40.21 km。



图4 研究区域的土地利用类型

Fig.4 Land use type of study area

2.2 降雨数据

模型率定采用2021年7月21日的实测降雨数据(见图5),由于受台风的影响,3 h降雨量已超10年一遇市政标准。参考深圳市暴雨强度公式[见式(6)],并基于芝加哥雨型进行降雨设计。考虑到极端超标降雨事件,设计降雨的重现期分别设为10、20、30、50、100年,降雨历时为2 h(见图6),综合峰值系数取0.35。

$$q = \frac{1450.239(1 + 0.594 \lg P)}{(t + 11.13)^{0.555}} \quad (6)$$

式中: q 为暴雨强度, $L/(s \cdot hm^2)$; P 为重现期,年; t 为降雨历时,min。

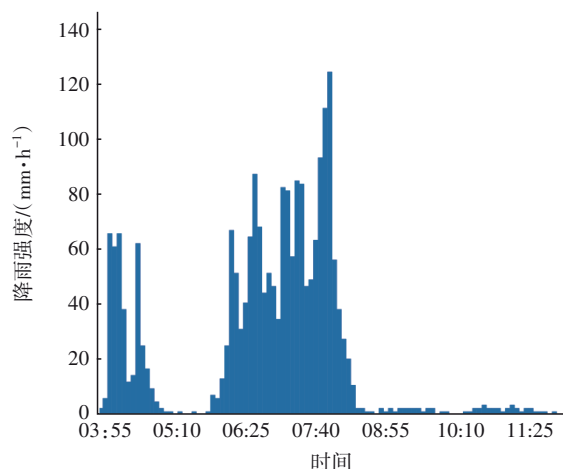


图5 2021年7月21日的实测降雨

Fig.5 Observed rainfall on July 21, 2021

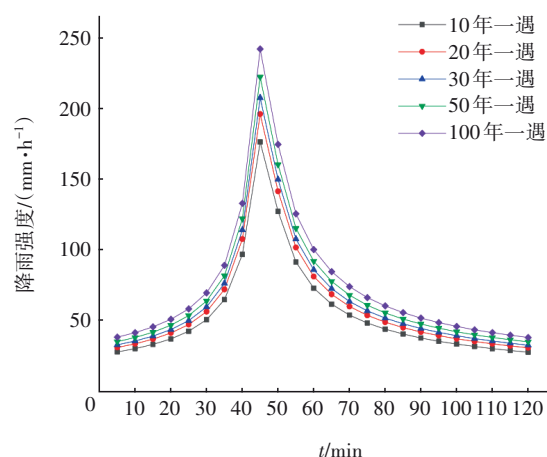


图6 设计降雨过程曲线

Fig.6 Design rainfall process curve

2.3 模型参数

SWMM软件在雨洪模拟方面应用广泛。本研究利用SWMM5.1构建模型,并根据研究区域的地形特征、建筑物和不透水下垫面分布进行子汇水区的划分。模型中管道内的水力计算采用动态波模型,子汇水区的入渗过程采用Horton模型。

根据汇水区的实际情况并结合模型手册设定参数初始值,并将地表曼宁系数、洼蓄量、最大入渗率、最小入渗率和衰减系数作为校准参数。由于研究区域内无流量监测站,缺乏模型排放口实测流量数据,故主要根据研究区域内涝实地调查情况进行参数率定,参数取值见表2。通过对比实测和模拟结果发现,研究区域内3处溢流点的淹没深度分别为0.30、0.71、1.03 m,误差分别为1.53%、4.20%、3.00%,在误差允许范围之内,且淹没区域位置与实际情况基本一致。以上结果表明,所建模型可信度较高,能真实反映研究区域的内涝情况。

表2 模型参数取值结果表

Tab.2 Result Table of model parameter values

参数	取值范围	最终取值
不透水区曼宁系数	0.011~0.240	0.012
透水区曼宁系数	0.011~0.410	0.200
不透水区洼蓄量/mm	1.27~2.52	1.27
透水区洼蓄量/mm	2.52~7.62	5.08
最大入渗率/(mm·h⁻¹)	30.00~200.00	75.00
最小入渗率/(mm·h⁻¹)	0.10~20.00	4.00
衰减系数/h⁻¹	2.00~7.00	4.00

2.4 不同拓扑结构雨水管网布局构建

首先将节点总度=4的节点剔除(共12个),然后

通过式(3)和式(4)计算得到节点中介中心性和紧密中心性的大小,结果见图7(a)。最终将两者加权计算后得到综合中心性,并按照大小排序后均分为3类(I1、I2、I3),划分结果见图7(b)。

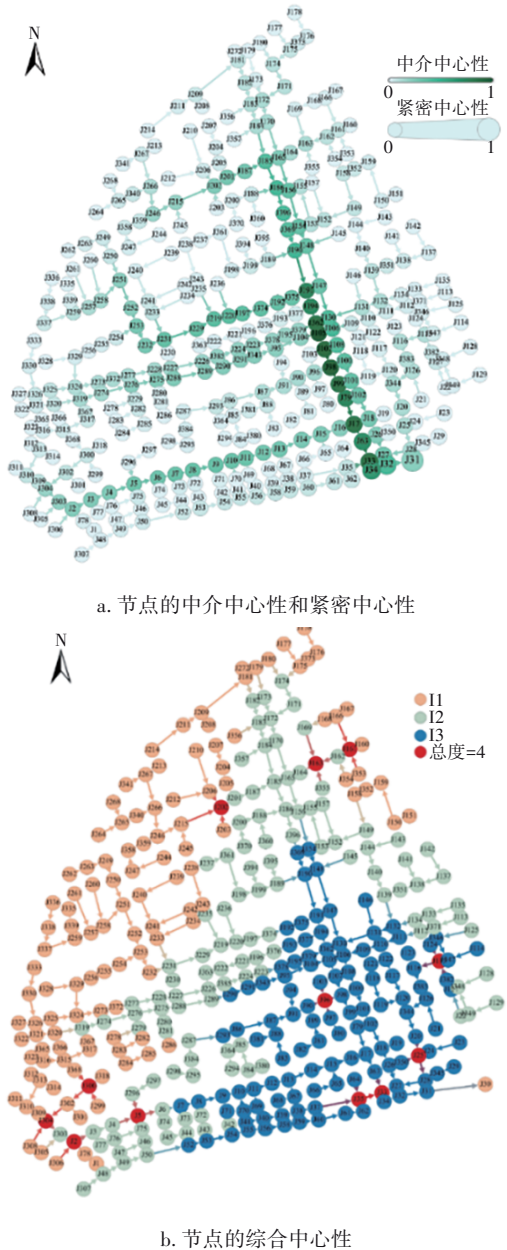


图7 节点中心性分析结果

Fig.7 Node centrality analysis results

依据图3,构建不同拓扑结构的雨水管网系统布局。由于本研究的现状雨水管网中,每类节点能构造的网格度有限,故最终选择构造网格度为10%、20%、30%的拓扑结构的雨水管网进行研究,最终构建9种布局(A₁、A₂、A₃、B₁、B₂、B₃、C₁、C₂、C₃),详见图8。

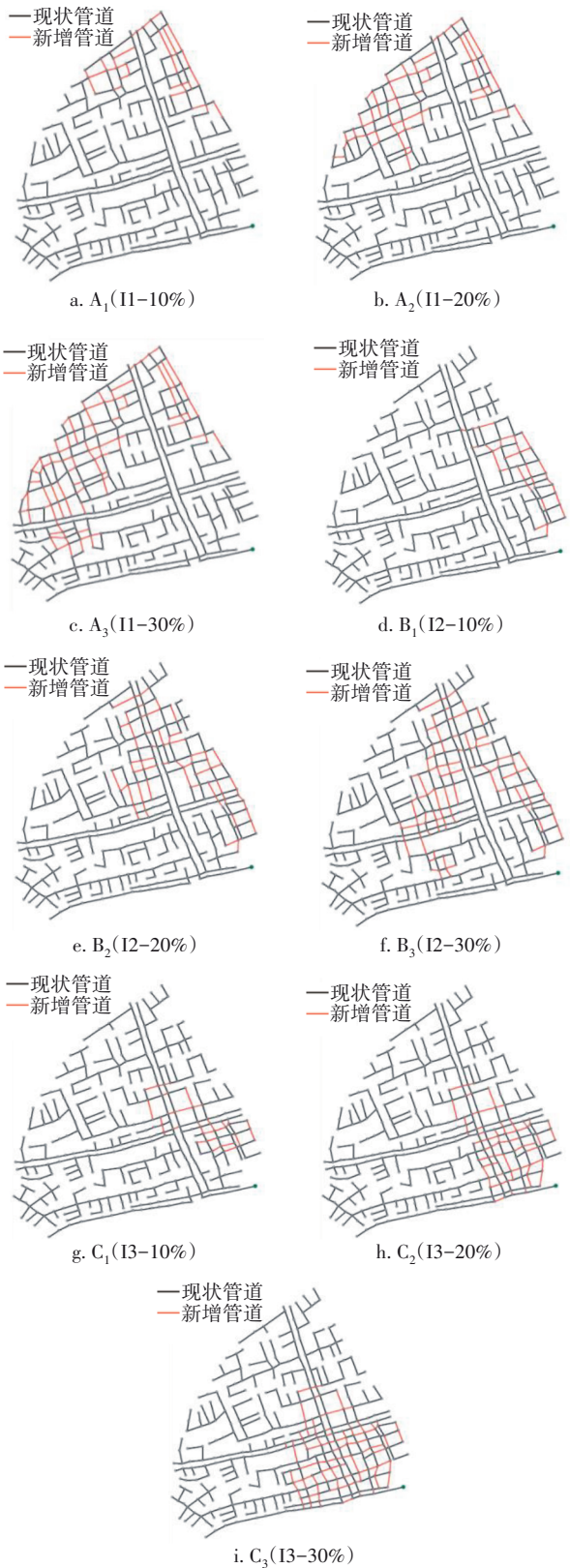


图8 9种拓扑结构的雨水管网布局

Fig.8 Layout diagram of storm sewer network with nine topologies

3 结果与分析

3.1 现状雨水管网系统内涝模拟结果分析

现状雨水管网系统内涝模拟结果见表3。在超标设计降雨下,溢流节点数和平均溢流时间都随着降雨重现期的增大而增大。在10年一遇重现期下,系统已有约50%的节点发生溢流,表明内涝现象较为严重。为方便比较系统性能前后的变化,本研究假设系统可接受的最低韧性阈值为0.75^[6]。由表3可知,随着降雨重现期的增大,系统承涝韧性值逐渐降低,系统性能逐渐下降。10、20、30年一遇重现期降雨下的系统韧性值分别为0.806、0.769、0.760,都在最低韧性阈值之上,说明系统在内涝发生后能够在一定时间内进行恢复。当降雨重现期达到50年一遇后,系统承涝韧性值低于最低阈值,将会对雨水管网系统本身产生影响和损害。

表3 现状雨水管网系统内涝模拟结果

Tab.3 Waterlogging simulation results of current storm sewer network

降雨重现期/年	溢流节点数/个	溢流节点占比/%	平均溢流时间/h	韧性值
10	183	49.73	3.24	0.806
20	204	55.43	3.55	0.769
30	214	58.15	3.59	0.760
50	235	63.86	3.73	0.735
100	252	68.48	3.85	0.713

3.2 不同拓扑结构布局下系统的承涝韧性分析

3.2.1 系统排水能力提升率

雨水管网系统的过水能力表征系统内雨水管网的运行状况,最下游管道的过水能力是整个雨水管网系统状态好坏的间接体现,可用来判断整个系统管道的健康程度。以现状管网为基准,通过计算系统排水能力提升率来分析不同布局的影响状况,计算方法:系统排水能力提升率=(现状最下游管道流量-不同布局最下游管道流量)/现状最下游管道流量,结果见图9。可知,不同拓扑结构布局下系统的排水能力提升率都为正值,表明通过新增管道引入环路这一措施能够加速系统内管道的排水。这一方面是新增管道加大了现状系统的储水容积;另一方面是新增管道为管道内雨水流动提供了更多的路径选择,避免壅水时间堆积,充分发挥下游管道的排水潜力。从图9可以看出,整体上系统的排水能力提升率为: I3>I2>I1,其中C₃的值最高,为

19.14%;同为30%网格度下,在10年一遇降雨情景中B₃是A₃的3.88倍,在100年一遇降雨情景中B₃是A₃的4.38倍,这表明在综合中心性越高的节点上附加管道对系统排水能力的提升效果越明显,且综合中心性越高,系统排水能力提升率增加幅度越大。同I类雨水管网的网格度越大,系统排水能力越强,因为网格度越大意味着新增管道引入环路的数量越多,极大地提高了系统管道的冗余性。图9显示,随着降雨重现期的增大,A₁~C₁中的每个布局排水能力提升率逐渐下降,但是C₂和C₃布局的排水能力提升率却是增加的,表明每个布局对于降雨的响应结果不同。

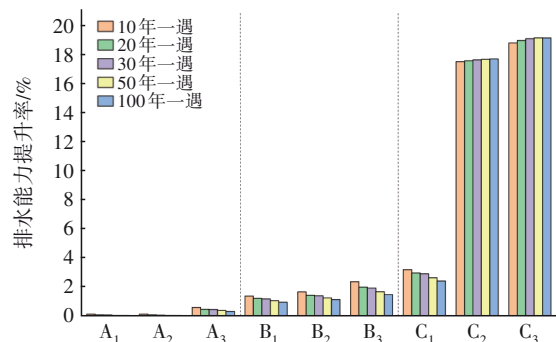


图9 不同布局下系统排水能力的提升率

Fig.9 Drainage capacity improvement rate under different layouts

3.2.2 系统平均溢流时间削减率

系统平均溢流时间表征区域整体地表积水平均持续时间情况,可反映雨水管网系统内涝灾害的严重度和危险度。以现状管网为基准,通过计算平均溢流时间削减率来分析不同布局的影响状况,计算方法:系统平均溢流时间削减率=(现状平均溢流时间-不同布局平均溢流时间)/现状平均溢流时间,结果见图10。可以看出,整体平均溢流时间削减率都为正值,表明新的布局都比现状管网的平均溢流时间要短,对系统内涝持续时间有所缓解。一方面,节点处有更多的流动路径,可有效进行雨量分配,减少了节点溢流的可能性和溢流时间;另一方面,雨水管网系统整体排水能力的提升,降低了溢流节点的数量。整体上可看出,在同一网格度下,系统的平均溢流时间削减率排序为: I3>I2>I1。I1和I2类平均溢流时间削减率随网格度的增大而增大,但是I3类在网格度为20%和30%时对系统平均溢流时间的削减效果相差不大,30年一遇降雨情景

下削减率仅相差0.58%,50年一遇降雨情景下削减率相差0.07%。因此,在综合中心性高的节点位置引入环路,平均溢流时间削减效果更好;I3类在网格度超过20%后,再继续新增管道,系统的平均溢流时间削减效果将不明显。

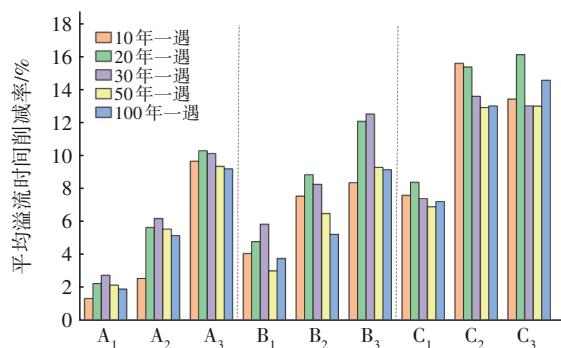


图10 不同布局下的平均溢流时间削减率

Fig.10 Average relief time reduction rate under different layouts

3.2.3 系统承涝韧性提升率

为全面综合量化评估系统性能,综合考虑系统排水能力、节点平均溢流时间等多种指标,通过式(2)可以计算出不同拓扑结构布局下的雨水管网系统承涝韧性值,以体现系统抵抗、吸收、恢复的能力,计算结果见图11(图中蓝色实线是假设系统最低韧性阈值为0.75^[4])。可知,随着降雨重现期的增大,每种布局的韧性值均逐渐下降,在10、20、30年重现期下,所有布局下的雨水管网系统韧性值都可达到0.75以上,50和100年重现期下只有少部分布局能够满足阈值要求。同I类网格度越大,系统环路就越多,韧性值就越高。

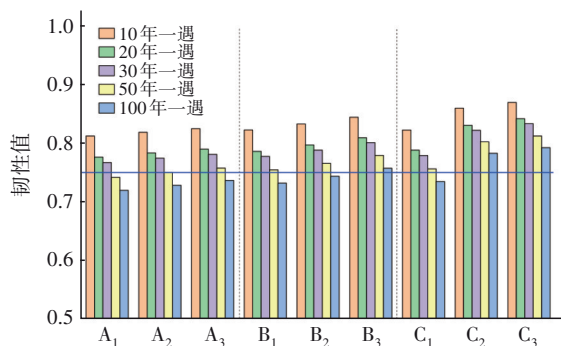


图11 不同布局下的韧性值

Fig.11 Resilience value under different layouts

以最大重现期100年一遇降雨下的模拟结果为例进行进一步分析。对于I1和I2类,随着网格度的增加,韧性值增长速度较为平缓;对于I3类,当网格

度从10%增至20%时,韧性值发生了6.57%的突增,而网格度从20%继续增至30%时,韧性值增长变缓。在同为10%的网格度下,B₁的韧性值为0.732,C₁的韧性值为0.735,差距微小,都能起到近似相同的效果;当网格度为20%和30%时,不同I类的韧性值差异较大,如在30%网格度下,A₃、B₃、C₃的韧性值分别为0.737、0.758、0.793,B₃和C₃的韧性值相比A₃分别增长了2.85%、4.62%。

以现状管网系统的韧性值为基准,计算韧性提升率来比较不同拓扑结构布局的优劣,计算方法:系统韧性提升率=(不同布局韧性值-现状韧性值)/现状韧性值,计算结果见图12,图中的圆圈大小表示3类节点的综合中心性,圆圈的颜色代表不同的设计降雨重现期。在10%网格度下,I2和I3类的圆圈重叠度较高,表明韧性提升效果相似;且I1类不同重现期的圆圈也有部分重叠,对于不同降雨强度有类似的响应结果。随着网格度的增大,圆圈的重叠度变小,表明网格度的增大会让不同重现期降雨的影响差距更明显,因此通过新增管道引入环路在高重现期下产生的韧性提升效果更明显。在所有布局中,C₃的韧性提升率最高,能够达到11.21%。

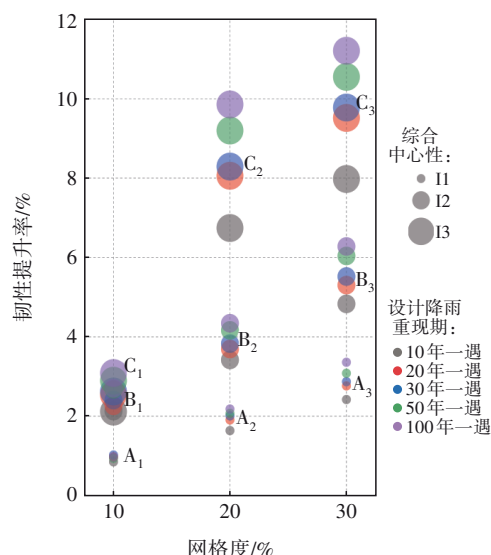


图12 不同布局下的韧性提升率

Fig.12 Resilience improvement rate under different layouts

4 结论

① 无论是雨水管道系统的排水能力提升率、平均溢流时间削减率还是韧性提升率,9种不同拓扑结构雨水管网布局下的结果都为正值,表明通过

新增管道来引入环路是增加雨水管网系统冗余度和提高承涝韧性的一个重要措施。

② 在综合中心性越高的节点上附加管道,对系统排水能力的提升效果越明显,系统排水能力提升率增加幅度越大,且每种布局对于不同重现期降雨的响应结果不同;I1和I2类中平均溢流时间削减率随网格度的增大而增大,I3类中网格度超过20%后,再继续新增管道,系统的平均溢流时间削减效果将不明显。

③ 韧性值可作为一个综合指标来更全面充分地评价雨水管网系统性能。对于不同的设计降雨重现期(10、20、30、50、100年一遇),在综合中心性高的关键节点处新增管道比在其他节点处新增管道的韧性提升效果更明显;对于同I类,随着网格度的增加,系统韧性提升效果逐渐增大,当网格度从10%增加至20%时,韧性值会有剧增,在I3类中系统韧性提升率可达到6.57%;在低网格度(10%)下,无论在哪些位置增加管道,系统韧性提升效果均相差较小,而在高网格度(30%)下系统韧性提升效果更加明显,而且对降雨重现期的响应效果差距更显著。

④ 依据不同节点综合中心性和网格度构建的9种雨水管网布局中,C₃(I3-30%)布局在应对内涝灾害更具韧性,较现状管网的韧性提升率最高,能够达到11.21%。

参考文献:

- [1] 邵亦文,徐江. 城市韧性:基于国际文献综述的概念解析[J]. 国际城市规划, 2015, 30(2): 49-54.
SHAO Yiwen, XU Jiang. Understanding urban resilience: a conceptual analysis based on integrated international literature review [J]. International Urban Planning and Planning, 2015, 30 (2) : 49-54 (in Chinese).
- [2] OSHEEN, KANSAL M L, BISHT D S. Evaluation of an urban drainage system using functional and structural resilience approach[J]. Urban Water Journal, 2023, 20 (10): 1794-1812.
- [3] GUPTHA G C, SWAIN S, AL-ANSARI N, *et al.* Evaluation of an urban drainage system and its resilience using remote sensing and GIS [J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2021, 23: 100601.
- [4] ZHANG C, WANG Y T, LI Y, *et al.* Vulnerability analysis of urban drainage systems: tree vs. loop networks[J]. Sustainability, 2017, 9(3): 397.
- [5] LU J, LIU J, FU X, *et al.* Stormwater hydrographs simulated for different structures of urban drainage network: dendritic and looped sewer networks [J]. Urban Water Journal, 2021, 18(7): 522-529.
- [6] HESARKAZAZI S, HAJIBABAEI M, REYES-SILVA J D, *et al.* Assessing redundancy in stormwater structures under hydraulic design[J]. Water, 2020, 12 (4): 1003.
- [7] REYES-SILVA J D, HELM B, KREBS P. Meshness of sewer networks and its implications for flooding occurrence [J]. Water Science and Technology, 2020, 81(1): 40-51.
- [8] LU J, LIU J, YU Y, *et al.* Network structure optimization method for urban drainage systems considering pipeline redundancies [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2022, 13 (5) : 793-809.
- [9] MUGUME S N, GOMEZ D E, FU G, *et al.* A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems [J]. Water Research, 2015, 81: 15-26.
- [10] WANG M, FANG Y, SWEETAPPLE C. Assessing flood resilience of urban drainage system based on a 'do-nothing' benchmark [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112472.

作者简介:魏瑛侠(1998-),女,山东济南人,硕士研究生,主要研究方向为雨水管网系统模拟。

E-mail:weiyinxia@tju.edu.cn

收稿日期:2023-03-02

修回日期:2023-06-21

(编辑:刘贵春)