

基于源头减排的雨水系统排水能力提升研究

贺小军

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 为探究提升雨水系统排水能力的策略与技术方法,基于海绵城市建设理念,研究分析了源头减排、过程调蓄和末端调蓄对雨水系统排水能力提升的影响。结果表明,(1)合适的源头减排设施能有效提升雨水系统排水能力;过程调蓄和末端调蓄对设置点下游有峰值控制效果,对设置点上游无明显峰值控制效果,但对设置点上游的排水管渠有一定保障作用。(2)在有限的调蓄空间下实现较好的峰值控制效果,建议源头减排系统采取稳定边进水、边出水的控流模式。(3)以上海地区为例,由于土壤入渗率低,透水铺装和传统雨水花园对径流峰值控制效果一般;延时调节设施对径流峰值控制有显著效果,能有效提升雨水系统排水能力。

关键词: 雨水系统;峰值控制;排水能力提升;源头减排;延时调节技术

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0276-09

Study on Improving Drainage Capacity of Rainwater Systems Based on Source Control

HE Xiaojun

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: To explore the strategies and technical methods for improving the drainage capacity of rainwater systems, and based on the concept of sponge city construction, the impacts of source reduction, process storage and regulation, and terminal storage and regulation on enhancing rainwater system drainage capacity are studied and analyzed. The results indicate that (1) The appropriate source reduction facilities can effectively improve the drainage capacity of rainwater systems. The process and terminal storage and regulation have a peak flow control effect downstream of the installation point, but have no significant peak control effect upstream of the installation point, while providing a certain protective effect on the drainage pipelines and channels upstream of the installation point. (2) A favorable peak flow control effect is achieved under limited storage space. It is suggested that source reduction systems is used of a stable flow control mode of simultaneous inflow and outflow. (3) Taking the area of Shanghai as an example, due to the low soil infiltration rate, the permeable pavement and traditional rainwater gardens have a moderate effect on runoff peak control. The delay adjustment facilities demonstrate a significant effect on runoff peak control and can effectively enhance the drainage capacity of rainwater systems.

Keywords: rainwater system; peak flow control; enhancement of drainage capacity; source reduction; delay adjustment technology

0 引言

极端降雨事件已成为当下城市安全和城镇排水系统安全性、可靠性的重大威胁^[1]。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中提出,城市排水系统建设作为韧性城市建设的重要组成部分,肩负着保障城市水安全、支撑城市可持续发展的职责,打造具有高

排水能力的雨水系统对韧性城市建设具有重要意义。

日本东京市通过建设地下调蓄池和大型排水隧道,提高城市应对暴雨的能力^[2]。德国汉堡通过建设“蓝绿基础设施”,利用自然生态系统增强城市排水能力和抗洪能力^[3]。国内,路文丽^[4]以某市中心城区的项目为案例,通过雨污分流改造、管道修复、优化排水管径、建设末端雨水调蓄池和提升泵站,将项目区域排水能力从2年一遇提升至10年一遇。吴传杰^[5]以成都市下沉隧道为例,通过智慧水务管理和泵站建设,提升下穿隧道约46%的排水能力。

收稿日期: 2025-10-24

作者简介: 贺小军(1981—),男,本科,高级工程师,从事排水设计工作。

目前国内外对排水系统排水能力的提升研究与工程应用虽然较多,但大多集中在管网扩容、雨污分流、末端调蓄设施及泵站建设、智慧水务管理等方面,对源头减排建设提升排水系统排水能力的研究仍相对较少。源头减排设施作为城市排水系统的重要组成部分,研究开发能高效地提升雨水排水系统排水能力的源头减排技术、工艺对整个行业来说具有重大意义。

本文从源头减排、过程调蓄和末端调蓄三大方面,研究探讨调蓄设施位置差异对排水系统排水能力的提升效果;同时结合海绵城市规划指标要求,研究探讨具有高效排水能力提升的源头减排技术,为韧性城市建设及城市更新行动中排水系统的改善提供参考。研究技术路线图如图 1 所示。

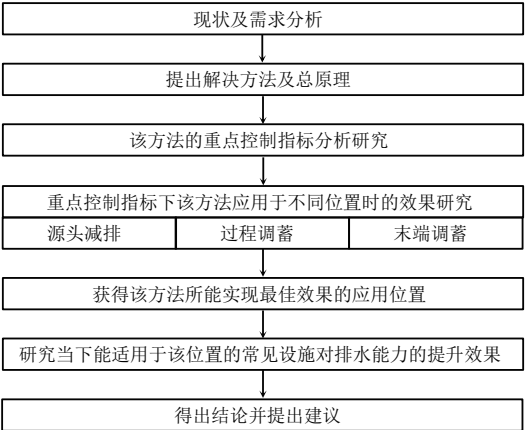


图 1 研究技术路线

1 城市排水系统排水能力现状

排水能力是衡量排水系统效能的关键指标,通常用设计重现期来表征。目前我国城市雨水排水系统排水能力远低于国标规定的排水能力。据相关统计数据,到 2020 年,上海中心城达到 3~5 年一遇排水能力的面积仅约为 16%^[6];截至目前,天津市中心城区 66.7% 区域排水标准达到 1 年一遇^[7]。

对于大多数老城区而言,地下管道改造成本高、社会影响大、地下空间不足,以及与现有混杂的其他管线的关系难以处理等问题,难以通过大规模扩大管径的方式提升排水能力。本文秉承海绵城市建设理念,研究在有限空间下城市排水系统排水能力提升的适用方法与技术。

2 雨水排水系统排水能力提升方法

欲使排水系统的排水能力得到提升,本质上在于将超过排水系统接纳能力的降雨径流全过程流量

控制在排水系统所能接纳的范围内,重点在于对降雨径流的峰值控制。径流峰值控制的核心是通过技术手段干预雨水的汇流过程,从源头、过程或末端削减峰值流量,延长汇流时间。

2.1 提升方法原理

用于削减峰值流量的调蓄设施,调蓄量的确定应根据设计要求,通过比较雨水调蓄工程上下游的流量过程线,按式(1)计算^[8]:

$$V = \int_0^T [Q_i(t) - Q_o(t)] dt \tag{1}$$

式中:V 为调蓄量或调蓄设施有效容积, m³; Q_i 为源头减排设施上游设计流量, m³/s; Q_o 为源头减排设施下游设计流量, m³/s; t 为降雨历时, s。

式(1)所需的基础资料较多,且所得结果需要根据试算结果不断修正,计算过程复杂。对此,美国联邦政府开发的 FAA 法是在其基础上的一种简化方法,如式(2)所示^[8]:

$$V = (Q_i - Q_o)t \tag{2}$$

式中:Q_i 为暴雨峰值流量; Q_o 为调蓄设施平均出口流量(适用于串联式调蓄设施)或下游排水系统设计流量(适用于并联式调蓄设施); t 为降雨历时。

由于式(2)中 Q_o 的定义不够明确,美国科罗拉多大学的 James C.Y.Guo 教授对 FAA 法进行了修正,如式(3)所示^[8]:

$$V = Q_i t - 0.5 Q_a (t + t_c) \tag{3}$$

式中:Q_a 为调蓄设施的最大允许出口流量(适用于串联式调蓄设施)或下游排水系统设计流量(适用于并联式调蓄设施); t_c 为集水时间。

日本对调蓄池容积的计算方法如式(4)所示^[9]:

$$V = (r_i - \frac{r_c}{2}) \cdot t_i \cdot f \cdot A \cdot \frac{1}{360} \tag{4}$$

式中:r_i 为某一降雨历时 t_i 时的降雨强度, mm/h; r_c 为调蓄池过流能力对应的降雨强度, mm/h; t_i 为降雨历时, s; f 为径流系数; A 为汇水区域面积, hm²。

20 世纪 80 年代,同济大学邓陪德教授根据雨水调蓄池高峰流量时入池调蓄、低流量时脱过的作用,提出了重力流模式雨型径流过程线法的推理公式,如式(5)计算^[10]:

$$V = \left[- \left(\frac{0.65}{n^{1.2}} + \frac{b}{t} \cdot \frac{0.5}{n + 0.2} + 1.10 \right) \cdot \log(\alpha + 0.3) + \frac{0.215}{n^{0.15}} \right] \cdot Q_i t \tag{5}$$

式中:V 为调蓄量或调蓄设施有效容积, m³; b、n 为暴雨强度公式参数; t 为降雨历时, s; α 为脱过系数,取

值为调蓄设施下游和上游设计流量之比; Q_i 为源头减排设施上游设计流量, m^3/s 。

水是不可压缩的,无论是何种调蓄方法,原理都是一致的,通过建设具有一定规模的调蓄空间,将降雨过程中排水系统无法排出的雨水暂时存储下来,这也是式(1)所体现的本质。

从式(1)可以看出,峰值控制主要与设施调蓄容积、入流流量过程、出流流量过程和降雨历时四个要素相关。其中,调蓄设施调蓄容积下限至少要能够存储超量的峰值雨水;入流流量过程与目标重现期降雨、下垫面类型、设施入口通道大小等因素相关;出流流量过程主要受设施自身结构形式影响,同时又受现状排水管网限制,不得超过设施下游排水管渠的受纳能力。基于此,若要在有限的调蓄空间下,实现一定的峰值控制效果,设施必须采取边进水边

出水的控流排放模式。因此,设施控流排放的合理设置尤为重要。

2.2 对空间的需求

雨水径流的存储排放的实质是雨水径流的空间分配问题^[11]。现以北京、上海、深圳、武汉、重庆等5座城市为例,研究探索如何解决径流峰值控制所需的

空间问题。
根据相关标准要求,特大城市中心城区的非重要地区雨水管渠设计重现期应为3~5年^[12]。现假定区域现状雨水管渠设计重现期为1年一遇,若通过增设调蓄设施来将现状1年重现期的管渠综合提升到能至少有效应对3年重现期降雨,根据前述式(5)计算可得出需要的设施有效容积如表1所示(由于容积的大小还与汇水面面积、径流系数等有关,故表1中将容积折算为不受影响的对应降雨量值)。

表1 各城市设施所需有效调蓄容积折算后对应降雨量

城市	暴雨强度公式 ^[13-17]	降雨历时/min	设施设计出流流量占现状管渠设计流量比例	设施所需有效调蓄容积对应降雨量/mm
上海	$q=1\ 600(1+0.846\lg P)/(t+7)^{0.656}$	5	50%	10.26
北京中心城区	$q=1\ 602(1+1.037\lg P)/(t+11.593)^{0.681}$	5	50%	9.64
武汉	$q=1\ 614(1+0.887\lg P)/(t+11.23)^{0.658}$	5	50%	9.66
深圳	$q=1\ 450(1+0.594\lg P)/(t+11.13)^{0.555}$	5	50%	10.30
重庆沙坪坝	$q=1\ 132(1+0.958\lg P)/(t+5.408)^{0.595}$	5	50%	9.90

从表1可以看出,将现状1年重现期的管渠综合提升大小到能有效应对3年重现期降雨所需要的空间并不大,最高也不超过11 mm降雨所产生的径流量对应的空间。

根据年径流总量控制率分区图,上述5座城市所在分区最低要求的年径流总量控制率对应设计降雨量均大于11 mm^[18-19],即完成海绵城市建设指标所需要的空间容积大于前述计算的峰值控制所需空间容积。这表明设施建设适宜的规模,既能在完成海绵城市建设年径流总量控制率指标要求的同时,又能实现径流峰值的有效控制。

2.3 对出流流量控制的需求

2.3.1 流量控制的上限

不同汇水区雨水径流汇入同一管渠时,必然会出现流量叠加。其中,峰值与峰值叠加最为不利。面对各类复杂情况,在保障安全的前提下,应该将每一个汇水区径流峰值都控制在安全的范围内。这样即使出现峰值叠加,也不会超出排水管渠的受纳能力。

王嘉仪等^[20]在对郑州市排水管道沉积物的调研

中发现,调研区域内近75%的管道存在不同程度的沉积现象。李海燕等^[21]对北京城区部分雨水管道内沉积物沉积状况进行调研发现,管道内沉积现象普遍存在,其中高达41.67%的管道内沉积物厚度占管径的10%~30%。我国行业标准^[22]中规定了管渠最大允许积泥深度为管内径或渠净高度的1/5。

《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174)规定了调蓄设施下游出流流量的上限:“ Q 的取值不应超过区域开发前相同设计重现期下的雨水峰值流量和调蓄工程下游的受纳能力。”考虑到管渠并非时刻处于完全健康状态,为保障排水安全,设施下游出流流量上限值应适当降低。

2.3.2 流量控制的方式

参照《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)条文:排水管渠的水力计算根据流态可分为恒定流和非恒定流两种^[12]。恒定流条件下的流速计算有相应较为简单的计算公式,非恒定流条件下的计算则需要利用数学模型。目前大部分的排水管渠一般采用前者进行计算、设计。

受服务的汇水面大小、类型、形状等多种因素的

影响,同样的非恒定流出水的调蓄设施、相同的设计方式在不同的应用环境下所能实现的峰值控制效果和出流过程线是不一样的,再加上径流在管渠内流行时的叠加效应等,排水管渠各节点处的实时流量难以准确计算。

从式(1)可以看出,当调蓄设施上游流量过程线确定后,设施控流出水流量越大,所需要有效调蓄容积越小;当设施控流出水流量恒定控制在允许的最大流量时,计算所得的结果将是设施最小的有效调蓄容积。一方面实现目标所需要的空间规模越小,能让更多用地资源缺乏的区域有条件达成目标;另一方面利用越小的空间规模就能实现目标,使得同等设施有效体积规模下能留有更多的冗余空间去应对超出目标的降雨,让排水系统的安全性得到更高的提升。

综上所述,从匹配性、可规划设计性、可有效控制性、现场应用环境、排水韧性和排水安全等方面出发,调蓄设施的流量控制方式选择稳定恒定流量出水是最佳的选择。

2.4 对存储的峰值雨水径流的要求

《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017)中明确规定:“用于削减峰值流量的雨水调蓄工程宜优先利用现有调蓄空间或设施,应将服务范围内的雨水径流引至调蓄空间,并应在降雨停止后有序排放。”这里的“降雨停止后有序排放”具有以下多方面的意义:(1)避免降雨时排放影响整体峰值控制效果;(2)待外部接纳水体水位下降至一定程度后延时排放,减轻接纳水体压力;(3)匀流排放,避免出现二次峰值,产生安全隐患;(4)在一定时间内排空以便能有效应对下一场降雨。

3 源头减排、过程调蓄和末端调蓄对排水系统的排水能力影响

截至当前,很多地区和项目仅以在过程或末端建设调蓄池的方式来实现排水能力提标,忽略了源头减排的重要作用。

3.1 末端调蓄

王建龙等^[23]通过研究发现,由于强降雨时雨水径流无法有效汇入末端调蓄池,故采用末端集中式调蓄池无法有效解决上游区域管道冒溢问题。

从排水能力提升上看,末端调蓄控制对上游排水管网并未带来影响,故不能提升能排水系统的排水能力;但从全局来看,末端调蓄在一定程度上可避

免因外部河、湖水位过高引起顶托造成内部管网排泄能力降低,是保障原有排水管渠设计排水能力的重要手段之一。

3.2 过程调蓄

过程调蓄可认为是小区域的末端调蓄,因此具有末端调蓄的一些特点。一方面,过程调蓄未对上游排水管网带来影响;另一方面,由于过程调蓄设施的控制排放,对设施下游的管网会存在一定的影响。同时,过程调蓄进水受到前端排水管网的限制,导致整个排水系统为排水能力提升效果变得更为复杂。

本文以 2.1 中式(1)为基础,基于水量平衡原理,采用有限差分法计算调蓄设施流量过程。如图 2 所示,将整个过程划分为若干个时段(Δt),在每个时段内,调蓄设施蓄水体积变化为该时段入流量与流出流量的差值 $\Delta V = V_{t+\Delta t} - V_t$,若时段划分足够小,则可用该时段起止时刻流量的平均值来替代该时段平均流量,基于此可得到式(6):

$$\frac{V_{t+\Delta t} - V_t}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t+\Delta t}}{2} - \frac{O_t + O_{t+\Delta t}}{2} \quad (6)$$

式中: $V_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻设施蓄水量, L ; V_t 为 t 时刻设施蓄水量, L ; Δt 为时间变化步长, s ; I_t 为 t 时刻入流流量, L/s ; $I_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻入流流量, L/s ; O_t 为 t 时刻设施出流流量, L/s ; $O_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻设施出流流量, L/s 。

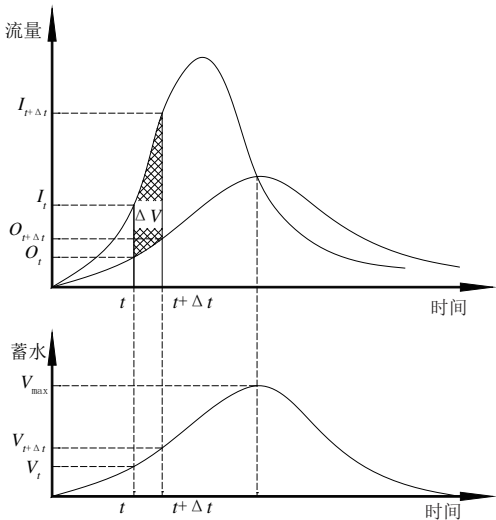


图2 调蓄设施有限差分法计算原理

式(6)中各时刻入流流量分为两种情况。一为不受外部条件限制径流直接进入调蓄设施,可根据所需要有效应对的目标降雨重现期按芝加哥雨型、对应汇水面面积、综合径流系数计算确定,见式(7)^[11]、(8);二为受外部因素影响后径流再进入调

蓄设施,如径流通过小直径管道输送至调蓄设施,需将管道的输送能力与各时刻的产流量做对比,取小值作为入流流量值。

$$q_a = \frac{A_1[(1-n)t_b/r+b]}{(t_b/r+b)^{n+1}}$$
$$q_b = \frac{A_1[(1-n)t_a/(1-r)+b]}{(t_b/(1-r)+b)^{n+1}} \quad (7)$$

式中: q_a 为某时刻上升段暴雨强度,mm/h; A_1,n,b 均为暴雨强度公式中的参数; r 为雨峰位置系数; t_a,t_b 分别为雨峰下降段和上升段的时间,min; q_b 为某时刻下降段暴雨强度,mm/h。

$$Q = 0.36q\Psi F \quad (8)$$

式中: Q 为某时刻径流流量,L/s; q 为暴雨强度,mm/h; Ψ 为综合径流系数; F 为汇水面积,km²。

设施采用重力流排水时,各时刻的出流流量与设施蓄水量存在相互依赖的关系,可通过调蓄设施的形式和各部位尺寸获得蓄水量与出流流量之间的对应关系,从而进一步计算得到每一个计算步长的出流流量和设施蓄水量。设施采用压力流排水(如泵排等)时,出流流量可取压力排水设备额定流量。

时间步长 Δt 的选择对计算精度有较大影响,因此应以能较准确地反映流量过程线的现状为原则。步长选择越长,计算精度越低。笔者通过大量计算发现,时间步长取6 s一般可将计算进度控制在3%

以内。本文后续计算均采用此方法,以6 s时间步长为基本单位,利用Excel软件进行计算分析。

现以图3所示的过程调蓄来分析其对排水系统的排水能力影响,假设管网均为重力流不考虑压力流情况,管渠内雨水流行时间相同,以上海市为例,(1)所有雨水管渠设计重现期均为1年;(2)单个子汇水面300 m²,径流系数0.9;(3)过程调蓄设施规模按70%年径流总量控制率(18.7 mm)设计;(4)过程调蓄设施水泵排放流量为对应区域汇水面1年重现期设计流量的70%;(5)设计暴雨参考上海市《暴雨强度公式与设计雨型标准》(DB 31/T 1043)。

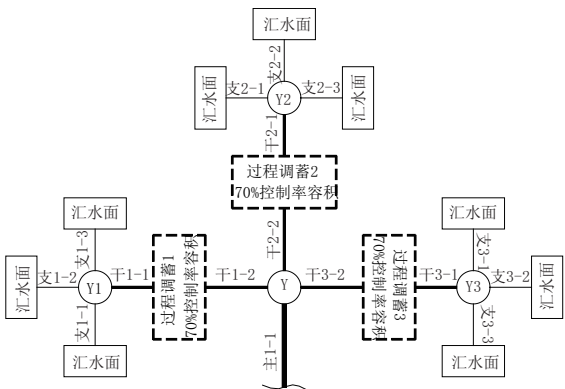


图3 过程调蓄示意图

经计算,设置过程调蓄设施且遭遇5年重现期暴雨时,排水系统各管段起始端接纳的径流过程与实施前遭遇1年重现期暴雨时起始端接纳的径流过程对比如图4所示。

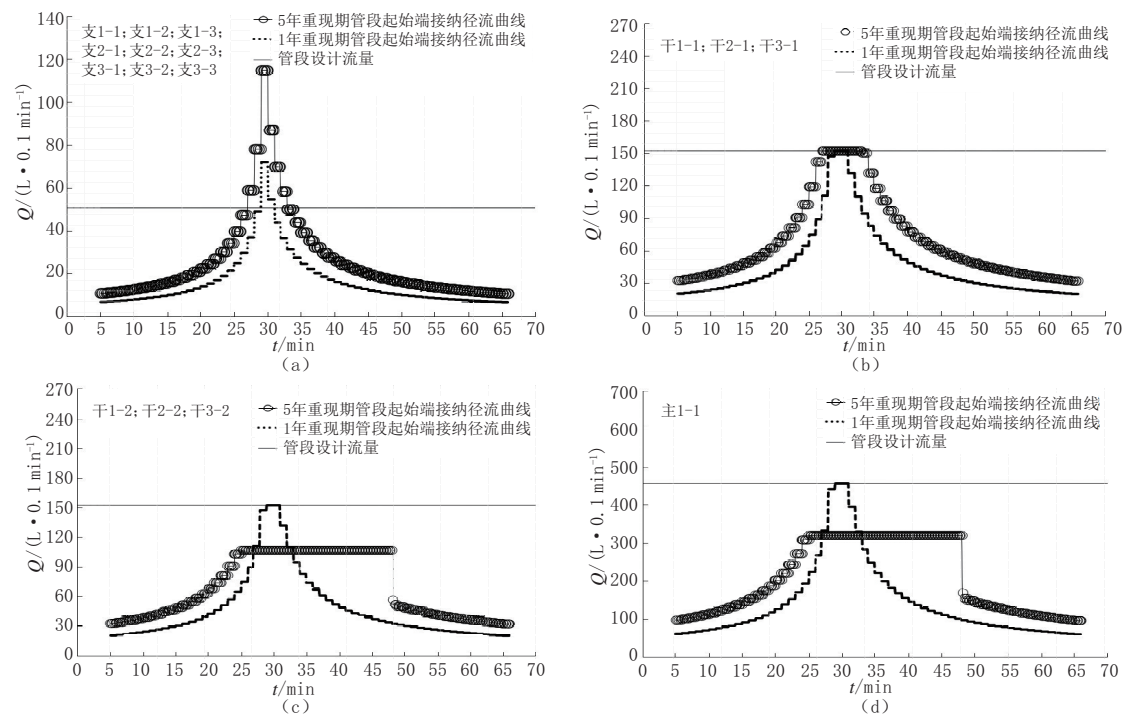


图4 过程调蓄各管段起始端接纳径流曲线

从计算结果可以看出:

(1)过程调蓄设施上游的支管段未受到影响,整个降雨历时过程中仍会出现过载情况。

(2)“干 1-1、2-1、3-1”管段之所以刚好能有效应对 5 年重现期降雨,主要是因为支管段的出流本身就在其所能容纳的范围内。

(3)“干 1-2、2-2、3-2”管段所接纳的雨水径流在整个过程中均为出现陡增的情况,说明过程调蓄设施体积规模足够,并未出现溢流。根据计算,过程调蓄设施体积利用效率仅为 26.56%。

(4)“干 1-2、2-2、3-2”和“主 1-1”管段所接纳的 5 年重现期降雨径流实时状态较之无设施时且接纳的 1 年重现期降雨径流实时状态更好,原因在于:a.这部分管段的入流受到了前端管段的限制,并没有让所有下垫面产生的径流顺利传输至这部分管段;b.过程调蓄设施又将受限后的径流进一步整合控制,坦化了径流峰值。

从排水系统全局来看,过程调蓄只赋予了下游管网能够应对更高重现期降雨的能力,并未让整个管网都能应对更高重现期降雨。

3.3 源头减排

现以如图 5 所示的源头减排来分析其对排水系统的影响。管网设定、暴雨参考标准、汇水面特性等均与前述“过程调蓄”小节中一致,设施体积规模按 70% 年径流总量控制率设计,设施控流排放流量分别为对应区域汇水面 1 年重现期设计流量的 10%、70%。

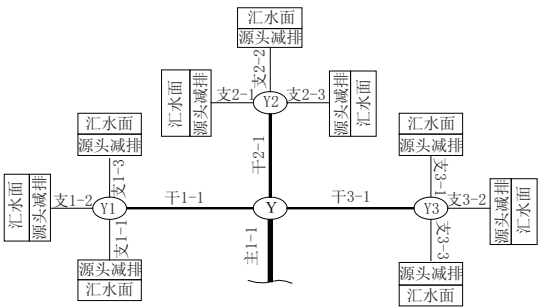


图 5 源头减排示意图

经计算,当设置了源头减排设施且遭遇 5 年重现期暴雨时,排水系统各管段起始端接纳的径流过程与实施前遭遇 1 年重现期暴雨时起始端接纳的径流过程对比如图 6 所示。

从计算结果可以看出:

(1)源头减排设施可以使现状排水系统有效应对高于自身设计标准的降雨。

(2)要做到现状排水系统能够有效应对高于自

身设计标准的降雨,源头减排设施的运行工况、参数应选择合理。

(3)在源头减排设施控流流量占比为 70% 时,支管段所接纳的雨水径流在整个过程中均未出现陡增的情况,说明源头减排设施体积规模设置足够,并未出现溢流的情况,本排水系统能够有效应对的暴雨重现期超过 5 年。

从排水系统全局来看,合理设置运行工况和参数的源头减排设施赋予了整个管网能够应对更高重现期降雨的能力,让整个管网都能应对更高重现期降雨,能有效提升排水系统的整体排水能力。

4 常见源头减排设施对排水系统排水能力的影响

本文后续研究均以上海市为例,研究中基本设定统一如下:(1)芝加哥雨型,雨峰位置系数 0.405;(2)暴雨强度公式 $q=1\ 600(1+0.846\lg P)/(t+7)^{0.656}$;(3)汇水面积 300 m²、径流系数 0.9、地面集水时间 5 min、管渠内雨水流行时间 0 min;(4)现状管渠重现期 1 年;(5)源头减排设施规模 5.049 m³(按 70% 年径流总量控制率设置);(6)土壤稳定入渗率和初始入渗率按《城镇内涝防治技术规范》(GB 51222—2017)建议参考值计取,分别取 11.4 mm/h、43 mm/h(土壤类型按湿润砂土、基本无植被计,取高值^[11])。

《海绵城市建设技术评价标准》(GB/T 51345)中将源头减排设施划分为两大类,分别是“渗透、渗滤及滞蓄设施”和“延时调节设施”。现就标准中两类设施中常见、典型的设施做进一步研究计算,计算方法采用 3.2 中有限差分法,对于有土壤入渗情况的设施,根据质量守恒原理,设施出流流量在该算法计算所得出流流量基础上扣除土壤入渗量后作为最终出流流量,土壤下渗能力根据霍顿入渗公式进行计算,土壤衰减常数取 3,如式(9)、(10)所示^[11]。

$$O_{t_{\text{出}}} = O_t - f_m A / 3600 \tag{9}$$

式中: $O_{t_{\text{出}}}$ 为 t 时刻设施最终出流流量, L/s; f_m 为土壤入渗率, mm/h; A 为有效渗透面积, m²。

$$f_m = f_c + (f_0 - f_c) e^{-\frac{k_0 t_x}{3600}} \tag{10}$$

式中: f_c 为稳定入渗率, mm/h; f_0 为初始入渗率, mm/h; k_0 为衰减常数, h⁻¹; t_x 为下渗时间, s。

4.1 渗透、渗滤及滞蓄类设施

现以最为常见的透水铺装和雨水花园为例进行分析。

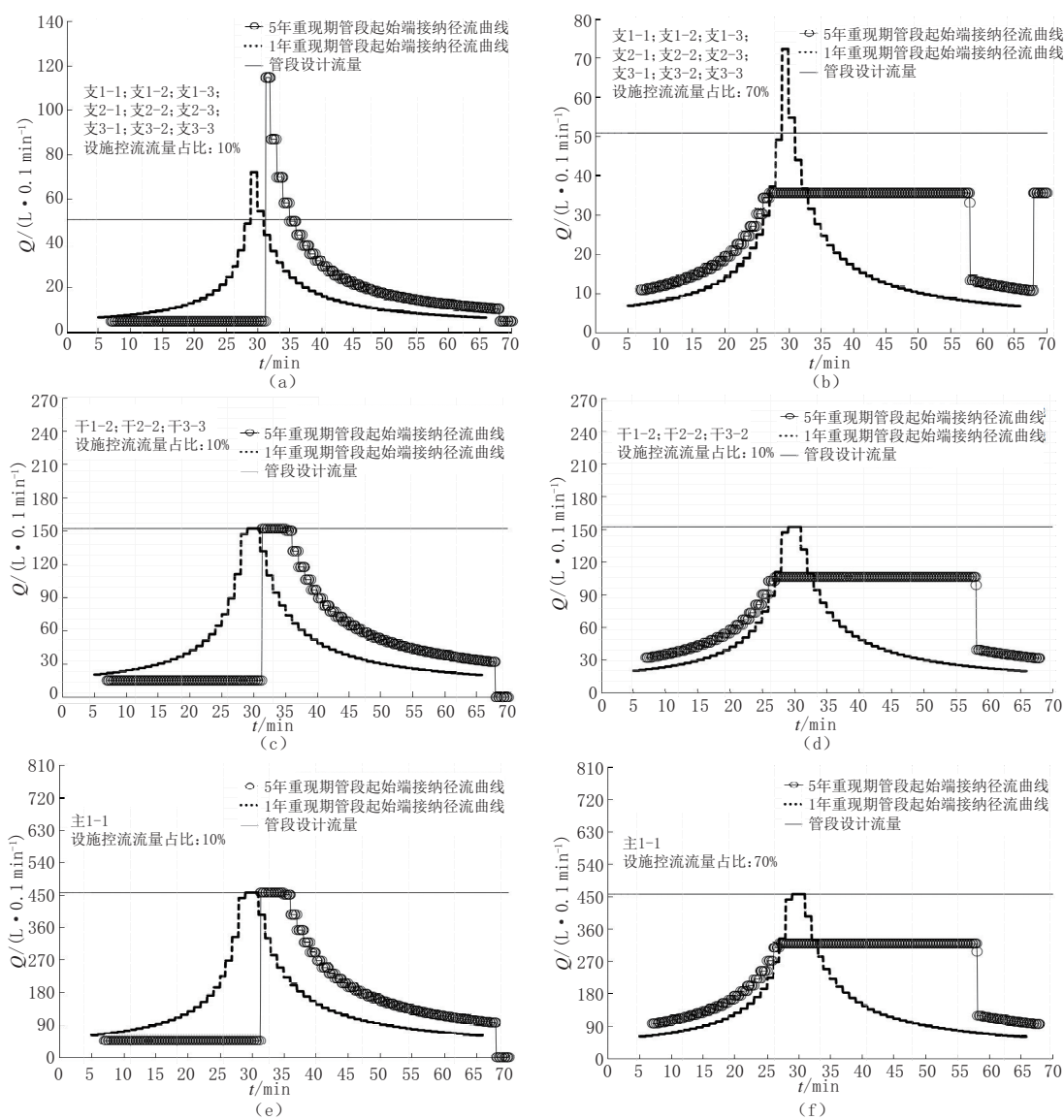


图6 源头减排各管段起始端接纳径流曲线

4.1.1 透水铺装

透水铺装控制效果受水文地质条件、应用环境等影响很大,一方面无法或难以下渗的地区,通过其结构层的雨水都经盲管排入管渠,对排水管渠水量和峰值影响不大;另一方面,道路基层都有相应的压实度要求,原位下渗速率低,水量和峰值控制效果也不明显。

现对汇水面做透水铺装改造,改造比例分别为60%、100%,假设蒸发和洼蓄量占总降雨量的10%,在遭遇2年重现期降雨时排水系统起始端所接纳的径流曲线如图7所示。

经计算,即使全透水铺装下垫面峰值削减率仅为11.42%,峰值削减后现状1年重现期排水管渠仍不能有效应对2年重现期降雨,透水铺装对排水系统的排水能力提升作用十分有限。

4.1.2 雨水花园

对于雨水花园下渗所削减径流量部分与透水铺装相似。现采用雨水花园控制雨水径流,雨水花园有效调蓄深度0.3 m,设计排空时间12 h,共设置雨水花园16.83 m²,改造后分别在遭遇2年重现期降雨和5年重现期降雨时排水系统起始端所接纳的径流曲线如图8所示。

经计算,采用雨水花园改造几乎对峰值削减没有作用,在遭遇2年重现期降雨时径流峰值削减率仅为0.64%,在遭遇5年重现期降雨时径流峰值削减率更低,仅为0.51%;究其原因,主要为:(1)在峰值来临前雨水花园的调蓄空间已被前期雨水占用,峰值径流无法再得到滞蓄;(2)雨水花园下渗面有限,基本无下渗削减。综上所述,采用70%年径流总量控制率体积规模的雨水花园控制雨水径流对排水系统排水能力提升作用也十分有限。

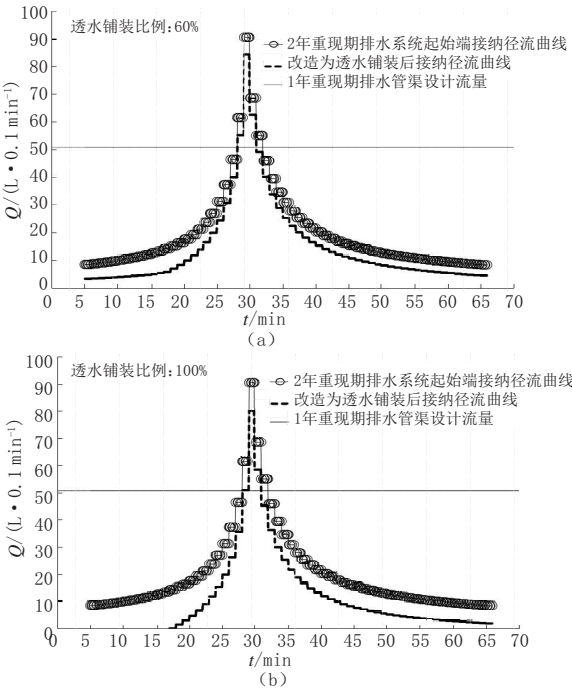


图7 透水铺装改造前后排水系统接纳径流曲线

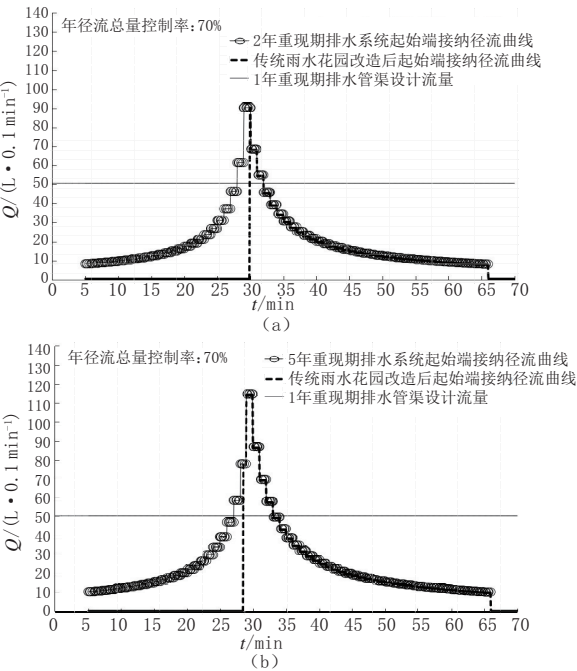


图8 采用雨水花园改造前后排水系统接纳径流曲线

4.2 延时调节类设施

延时调节设施按形式可分为延时调节塘、延时调节池、延时调节湿地、延时调节沟等。延时调节设施出流控制方式可为孔、堰、管、泵等多种形式,在其设计中,出水设计是重要的一环,直接影响着延时调节设施削峰性能^[24]。

4.2.1 排水能力提升效果

现采用延时调节设施控制雨水径流,设施控流排放流量设定为现状排水管渠设计流量的50%,在遭遇5年重现期降雨时,设施建设前后排水系统起

始端所接纳的径流过程如图9所示。

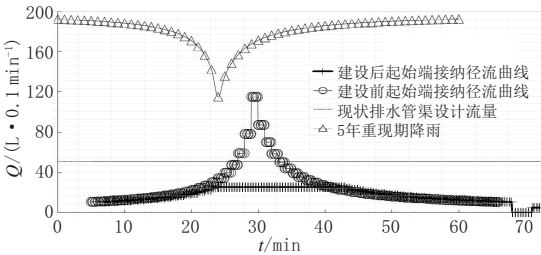


图9 设施建设前后排水系统起始端接纳径流曲线

经计算,建设前后,排水系统起始端所接纳的径流峰值具有明显的差别,建设后峰值削减率高达77.89%,峰值流量远低于现状排水管渠设计流量,不考虑其他因素的影响,现状1年重现期设计管渠完全能有效应对5年重现期降雨。

4.2.2 提升效果的可持续性

现继前4.2.1节中设定建设了延时调节设施若干年后,雨水管渠从1年升级改造为5年重现期标准,设施建设前(第一阶段)、设施建设后(第二阶段)、管渠升级改造后(第三阶段)排水系统起始端所接纳的径流过程如图10所示。

从图10计算结果可以看出,第一阶段管渠仅能有效应对1年及以下重现期降雨;第二阶段通过延时调节设施与管渠共同作用,能有效应对9年及以下重现期降雨;第三阶段,管渠得到改造更新,在延时调节设施不做任何改动时,设施与管渠共同作用能有效应对15年及以下重现期降雨。基于此结果可以得出,当排水管渠通过扩大管径、增强泵排能力等改造方式将自身排水能力提升后,已建的延时调节设施仍可以将排水系统排水能力提高到更高水平,排水能力提升效果具有良好的可持续性。

5 结 语

(1)要在有限的调蓄空间下实现一定的峰值控制效果,建议调蓄设施采取稳定边进水边出水的控流模式。调蓄设施设置在排水系统过程和末端只对设置点下游的排水系统有峰值控制效果,对设置点上游的排水系统无峰值控制效果。调蓄设施设置在源头且容积、控流排放等参数设计合理,能有效提升雨水排水系统排水能力。

(2)在土壤入渗率低、地下水位高的地区,透水铺装和传统雨水花园对雨水排水系统排水能力的提升效果不显著;合理设置运行参数的延时调节设施,能有效提升雨水排水系统排水能力。同时,当排水管渠自身排水能力提升后,已建的延时调节设施仍

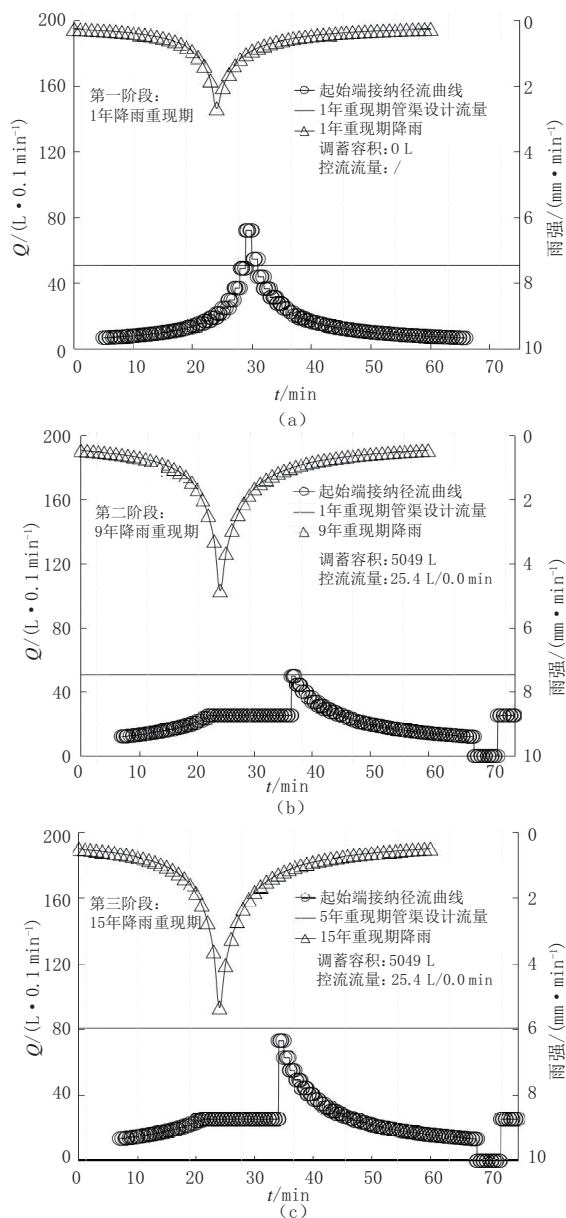


图 10 三个阶段排水系统起始端接纳径流曲线

可以将排水能力提升到更高水平,排水能力提升效果具有良好的可持续性。

(3) 本文以现状排水系统具有一定的排水能力为前提,研究成果可为城市更新行动中老旧小区、老城区等受环境所限难以扩管径的改造项目提供一种综合排水能力提升的新方式。

(4)提升排水系统韧性对于确保城市的可持续发展和安全运行至关重要。打造具有高排水能力的排水系统是排水系统韧性建设的关键之一,随着信息技术应用在水务行业实践中的不断深入,管理水平的智慧化、精细化将越加显著,两者有机地结合将能更好地为韧性城市建设提供重要指导和技术支持。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国应急管理部. 国家防灾减灾救灾委员会办公室 应急管理部发布 2023 年全国自然灾害基本情况[EB/OL].2024-01-20. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120_475697.shtml.
- [2] Katsuyuki, Kimura, Hirohide, et al. Introduction of the Metropolitan Area Outer Underground Discharge Channel[J]. The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan, 2009, 129(4): 200-203.
- [3] Arlati A, Rdl A, Konjaria-Christian S, et al. Stakeholder Participation in the Planning and Design of Nature-Based Solutions. Insights from CLEVER Cities Project in Hamburg[J]. Sustainability, 2021, 13(5): 2572.
- [4] 路文丽. 城市更新视域下市政排水管道改造的设计与实践[J]. 城市开发, 2025(11): 99-101.
- [5] 吴传杰. 提升城市排水系统韧性——智慧水务与隧道排水改造研究[J]. 城市道桥与防洪, 2025(3): 169-173.
- [6] 上海市水务局. 上海市水务局关于印发《上海市排水“十四五”规划》的通知[EB/OL].2021-11-12. <https://swj.sh.gov.cn/ghjh/20211118/b66a1a7e231d4c1f8369ffa7790f8925.html>.
- [7] 天津市人民政府. 推动水务高质量发展提升我市水安全保障能力[EB/OL]. 2025-5-13. https://www.tj.gov.cn/sy/xwfbh/xwfbh_210907/202505/t20250514_6930472.html.
- [8] GB 51174—2017 城镇雨水调蓄工程技术规范[S].
- [9] 汪明明. 雨水池设计理论研究[D]. 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2008.
- [10] 邓培德. 雨水调节池容积的模式雨型径流过程线法的计算[J]. 给排水技术, 1983, 9(1): 19-25.
- [11] GB 51222—2017 城镇内涝防治技术规范[S].
- [12] GB 50014—2021 室外排水设计标准[S].
- [13] DB 31/T 1043—2017 暴雨强度公式与设计雨型标准[S].
- [14] DB 11/T969—2016 城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准[S].
- [15] DB 4201/T 641—2020 武汉市暴雨强度公式及设计暴雨雨型[S].
- [16] 深圳市气象局. 深圳市暴雨强度计算公式及查算图表[M]. 深圳: 深圳气象局, 2015.
- [17] 重庆市住房和城乡建设委员会. 关于发布重庆市暴雨强度修订公式及设计暴雨雨型的通知[EB/OL].2017-08-23. http://zfxcjw.cq.gov.cn/zwxx_166/bmdt/bmdt_23631/201708/t20170823_4042380.html.
- [18] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [19] DBJ/T 15-261—2023 海绵城市建设技术标准[S].
- [20] 王嘉仪, 潘丽, 来志强. 郑州市排水管道沉积物现状及特性分析[C]. 中国水利学会 2020 学术年会, 北京, 2020: 393-397.
- [21] 李海燕, 梅慧珊, 徐波平. 北京城市雨水管道中沉积物的状况调查与分析[J]. 中国给水排水, 2011, 27(6): 36-39.
- [22] CJJ 68—2016 城镇排水管道与泵站运行、维护及安全技术规程[S].
- [23] 孙铮, 王建龙, 张长鹤, 等. 基于 SWMM 模型的城市已建区排水防涝提标改造途径探讨[J]. 环境工程, 2022, 40(9): 199-207.
- [24] 葛裕坤, 车伍, 武彦杰, 等. 延时调节设施及其用于城市内涝和径流污染控制分析[J]. 中国给水排水, 2015, 31(24): 5-10.