

建筑小区绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统的构建模式

陈彦熹, 李旭东, 刘建华, 刘小芳, 赵 坤, 马旭升
(天津市建筑设计院, 天津 300074)

摘 要: 以径流源头控制的重要实施区域——建筑小区为研究对象,提出了绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统的构建流程,并对具有调蓄功能的绿色基础设施及灰色设施建立调蓄容积估算模型,针对高、低开发强度两类建筑小区分别建立适宜的绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统。研究表明,在低开发强度小区,通过合理构建具有调蓄功能的绿色基础设施即能够满足高年径流总量控制率的调蓄要求;而在高开发强度小区,通过增加下垫面的渗透比例能够有效降低小区所需的调蓄水量,从而减少灰色设施的建设规模。

关键词: 绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统; 建筑小区; 雨洪管理; 年径流总量控制率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)17-0134-05

Construction Mode of Green - Grey Stormwater Detection and Retention System in Building Site

CHEN Yan-xi, LI Xu-dong, LIU Jian-hua, LIU Xiao-fang, ZHAO Shen, MA Xu-sheng
(Tianjin Architecture Design Institute, Tianjin 300074, China)

Abstract: Building site, which was an important implementation area of runoff source control, was taken as the research object, construction procedure of green - grey stormwater detection and retention system was proposed, and a storage capacity estimation model was established for green infrastructure and gray facilities with storage function. For high and low construction density site, two kinds of appropriate green - grey stormwater detection and retention systems were built respectively. The results indicated that in the low density building site, green infrastructure with storage function which was reasonable constructed could meet the storage requirements of high volume capture ratio of annual rainfall; in high density building site, storage capacity could be effectively reduced by increasing the infiltration ratio of the underlay surface, so as to reduce the grey infrastructure construction scale.

Key words: green - grey stormwater detection and retention system; building site; stormwater management; volume capture ratio of annual rainfall

为解决城市内涝及非点源污染等城市水文循环问题,在建筑小区通过源头控制的方式削减降雨过程的洪峰流量及径流总量已得到国内雨洪管理工作者的广泛认同。建筑小区作为整个城市雨水排水系统的起点,降雨径流的就地控制能从源头减少汇水

区的径流总量,降低非点源污染,因此,建筑小区的雨洪管理能力和效果关系到整个城市的雨洪管理水平^[1]。

在雨洪管理过程中,调蓄是维持自然水文循环和城市良性水文循环的关键环节,调蓄设施是城市

雨水系统的核心设施之一^[2]。但国内在城市雨洪调蓄方面缺乏综合性、系统性的研究和分析,设计过程中往往仅单一、孤立地将各种绿色和灰色雨洪管理措施在区域内根据地势走向等简单布局,缺少综合、系统优化设置雨水管理措施和规模的方法。在建筑小区调蓄设施构建的过程中,调蓄设施局限于局部问题缓解和末端控制,投资较高,综合效果有限,重视灰色调蓄设施的调蓄能力,而忽略了绿色基础设施的调蓄能力。

为此,笔者通过建立建筑小区的绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统,以年径流总量控制率作为雨洪管理的控制目标,研究不同特点建筑小区的系统构建模式。首先,提出建筑小区绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统的概念、构建流程和方法;然后,根据年径流总量控制率的要求,分析典型绿色基础设施和灰色设施的调蓄能力,并建立调蓄容积的估算模型;最后,根据高、低开发强度小区的特点,构建不同特征的耦合雨洪调蓄系统。本研究旨在通过建立绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统,研究不同特征建筑小区雨洪调蓄系统的建立模式,确定合理、经济的绿色-灰色调蓄系统容积。

1 绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统的构建

雨水调蓄设施是在降雨期间调节和储存部分雨水,以削减径流峰值和径流污染的设施。雨水调蓄设施除了在强降雨事件中能够削减径流峰值、延迟洪峰时间外,在中小降雨事件中还能发挥显著的非点源污染控制作用,无论作为建筑小区内的径流过程控制设施还是末端控制设施,均能使污染物通过重力沉降过滤等得到去除,显著缓解雨水径流的初期冲刷效应。

Peng 等人^[3]在关于建筑小区内雨水调蓄对缓解市政排水压力的研究中得出,分散设置雨水调蓄设施效果等同于延长雨水排水管网设计中的降雨历时。由于灰色调蓄设施一般建设在地下空间,在建筑小区内大量分散建设将大大增加建设成本和设计难度,而在地面直接建设的绿色调蓄设施恰好能够达到分散调蓄的目的。宫永伟等人^[4]对建筑小区绿色和灰色调蓄设施的径流控制效果研究中发现,绿色基础设施有显著的调蓄效果,但在以往的研究中常常被忽略。

本研究建立的绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统,是将需要调蓄的雨水径流分散调蓄,在子汇水区

通过一个或多个串联的绿色基础设施进行调蓄控制,超出调蓄能力的径流进入小区雨水管,最终引入终端灰色雨水调蓄池中,使雨水在建筑小区内充分得到控制,绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统的构建流程如图1所示。

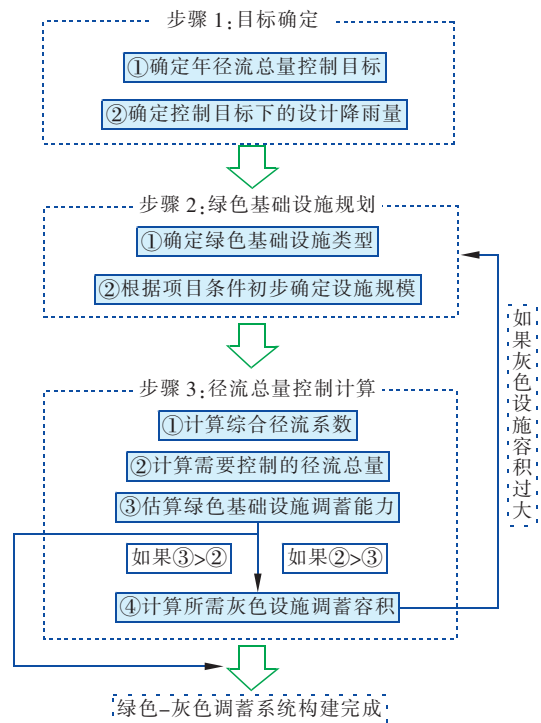


图1 绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统的构建流程

Fig. 1 Building process of green-grey stormwater detection and retention system

2 绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统容积估算

绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统中的核心为绿色基础设施和灰色调蓄设施。绿色基础设施的设计与景观设计相结合,综合景观效果及雨洪管理功能,除了具有截污减排效能,相对于灰色调蓄设施,还具有降低基础设施的建造和维护费用、鼓励基于环境敏感性的低成本开发等效能^[5]。国内外广泛应用的绿色基础设施主要包括绿色屋顶、雨水花园、植草沟、过滤带、下凹式绿地、透水铺装等,在设计过程中可以将几个设施合理布局形成逐级控制和净化的设施系统。灰色调蓄设施一般是指混凝土调蓄池、蓄水模块等不具有生态功能的蓄水设施,是区域内调峰防洪的关键。在项目规划设计初期,不同绿色基础设施的调蓄能力需要通过一定的方法进行估算,才能为灰色调蓄设施的容积估算提供依据,本研究根据几类常用的绿色和灰色设施特点建立了其调蓄

容积估算模型,其计算方法及各类设施的特点如表 1 所示。

表 1 常用绿色及灰色调蓄设施的容积估算方法

Tab. 1 Volume estimation method of green and grey stormwater detection and retention infrastructures

项 目	调蓄位置	调蓄容积估算模型	模型参数
绿色基础设施	下凹式绿地	下凹部分	$V_{\text{下凹}} = A_{\text{下凹}} \times H_{\text{下凹}}$ $V_{\text{下凹}}$ 为下凹式绿地调蓄容积, m^3 ; $A_{\text{下凹}}$ 为下凹面积, m^2 ; $H_{\text{下凹}}$ 为下凹深度, m
	雨水花园/植草沟	表层蓄水部分	$V_{\text{表}} = A_{\text{表}} \times H_{\text{表}}$ $V_{\text{表}}$ 为表层蓄水调蓄容积, m^3 ; $A_{\text{表}}$ 为表层蓄水面积, m^2 ; $H_{\text{表}}$ 为表层蓄水深度, m
		滞蓄部分	$V_{\text{滞}} = A_{\text{滞}} \times H_{\text{滞}} \times n_k$ $V_{\text{滞}}$ 为滞蓄层调蓄容积, m^3 ; $A_{\text{滞}}$ 为滞蓄层蓄水面积, m^2 ; $H_{\text{滞}}$ 为滞蓄层蓄水深度, m ; n_k 为填料孔隙率, %
灰色调蓄设施	景观水体	水体	$V_{\text{景观}} = A_{\text{景观}} \times (H_{\text{溢流}} - H_{\text{常}})$ $V_{\text{景观}}$ 为景观水体调蓄容积, m^3 ; $A_{\text{景观}}$ 为景观水体蓄水面积, m^2 ; $H_{\text{溢流}}$ 为景观水体溢流水位, m ; $H_{\text{常}}$ 为景观水体常水位, m
	调蓄池	调蓄池	$V_{\text{调蓄}} = A_{\text{调蓄}} \times H_{\text{溢流}}$ $V_{\text{调蓄}}$ 为调蓄池调蓄容积, m^3 ; $A_{\text{调蓄}}$ 为调蓄池蓄水面积, m^2 ; $H_{\text{溢流}}$ 为调蓄池溢流水位, m

3 绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统分析

绿色-灰色雨洪调蓄系统的合理构建需考虑多方面因素,其中项目的开发强度、年径流总量控制率要求是其中的关键因素。本研究以天津市的建筑小区为例,就高、低两种开发强度的典型建筑小区进行绿色-灰色雨洪调蓄系统的构建,研究不同年径流总量控制率下,建筑小区雨洪调蓄系统的构建模式及特点。

3.1 典型建筑小区概况

以高开发强度小区(简称为 H 小区)及低开发强度小区(简称为 L 小区)2 个新建小区为例,其中, H 小区为新建综合体项目地块,主要功能为办公、商业及公寓,特点为建筑密度高、绿地率低,占地面积为 $16\,200\text{ m}^2$,建筑面积为 $310\,000\text{ m}^2$,建筑密度为 65.0% ,绿地率为 6.0% ; L 小区为新建办公楼项目地块,主要功能为办公及服务,特点为建筑密度低、绿地率高,占地面积为 $8\,091\text{ m}^2$,建筑面积为 $3\,467\text{ m}^2$,建筑密度为 17.8% ,绿地率为 46.0% 。可知, H 小区的建筑密度是 L 小区的 3.65 倍,而绿地率仅为 L 小区的 13%。

3.2 绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统构建与分析

3.2.1 低开发强度小区

首先,初步确定绿色基础设施的设计方案。方案 1:绿色基础设施采用下凹式绿地及透水铺装,其中,下凹式绿地面积为 30% 的绿地面积,下凹深度为 100 mm ;透水铺装面积初步设定为 50% 的地面铺装面积。根据《天津市海绵城市建设技术导则》,计算得到 L 小区的综合径流系数为 0.45。

需要控制的径流总量 $V(\text{m}^3)$ 的计算方法如下:

$$V = 10\psi_{zc}h_yF \quad (1)$$

式中: ψ_{zc} 为综合雨量径流系数; h_y 为设计降雨量, mm ; F 为汇水面积, hm^2 。

当采用多种技术措施组合控制雨水径流总量时,各技术措施的有效滞蓄水量应符合以下要求:

$$V_e = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \geq 1.05V \quad (2)$$

式中: V_e 为各类技术措施控制的雨水径流总量, m^3 ; V_1 为渗透设施的储存容积, m^3 ; V_2 为调蓄池的贮水量, m^3 ; V_3 为下凹式绿地的滞蓄容积, m^3 ; V_4 为生物滞留设施的滞蓄容积, m^3 。

依据绿色基础设施方案的初步设定,采用下凹式绿地及透水铺装两种设施,透水铺装下方不设蓄水池,则绿色调蓄设施为下凹式绿地。计算 L 小区需要控制的径流总量及绿色调蓄设施的调蓄水量,结果表明,当年径流总量控制率分别为 55%、75% 和 85% 时,需调蓄的水量分别为 45.9、94.8、143.4 m^3 ;而绿色调蓄设施的调蓄水量为 111.7 m^3 。可知,方案 1 中绿色设施的调蓄水量满足 55% 和 75% 年径流总量控制率下的要求,但不满足 85% 年径流总量控制率下的要求。针对 L 小区的特点,通过将下凹式绿地的比例增加为 50% 或下凹深度增加为 150 mm (计算得到绿色设施调蓄水量分别为 186.1、167.5 m^3),即可以满足 85% 年径流总量控制率下的调蓄要求。因此,对于 L 小区,通过建设不同规模的具有调蓄功能的绿色基础设施即能够满足不同年径流总量控制率下的调蓄要求,无需建设灰色调蓄设施。

3.2.2 高开发强度小区

首先,初步确定方案 1 作为绿色设施的设计方

案。根据《天津市海绵城市建设技术导则》,计算得到H小区的综合径流系数为0.74。根据公式(1)和公式(2)计算得到在55%的年径流总量控制率下,所需调蓄水量为 152.9 m^3 ,而绿色基础设施的调蓄水量仅为 29.2 m^3 ,远不能满足调蓄要求。因此,为进一步增加绿色设施的调蓄能力,综合考虑可实施性及安全性,设计方案2如下:采用下凹式绿地及透水铺装两种绿色设施,其中下凹式绿地面积设定为80%的绿地面积,下凹深度设为200 mm。经计算绿色设施的总调蓄水量可达到 155.5 m^3 ,能够满足55%年径流总量控制率下的调蓄要求,可不建设灰色设施;但不能满足75%和85%年径流总量控制率下的调蓄要求(315.9 、 477.6 m^3)。基于H小区的特点,若要获得较好的雨洪控制效果,可以通过建设灰色调蓄设施来解决绿色基础设施不能调蓄的部分水量,则75%和85%年径流总量控制率下所需建设的灰色设施的调蓄容积分别为 160.4 、 322.1 m^3 ;或者通过降低小区下垫面综合径流系数的方式,来减少灰色设施的规模。

方案3:考虑到H小区65%的高建筑密度,可通过将部分屋面建设为具有渗透性的绿化屋面来降低H小区的综合径流系数。初步设定50%的建筑屋面建设成为绿化屋面,则H小区的综合雨量径流系数为0.60,75%年径流总量控制率下需要调蓄的水量为 253.7 m^3 ,所需建设的灰色设施的调蓄容积为 98.2 m^3 ,与不建设绿化屋面的方案相比,灰色调蓄设施容积降低了 62.3 m^3 。在年径流总量控制率为85%的条件下,H小区需要调蓄的水量为 383.5 m^3 ,根据H小区的实际条件及其作为商业综合体的交通道路需求,难以再通过其他绿色基础设施进行调蓄,因此还需要另外建设 228.0 m^3 的灰色调蓄设施。

3.3 分析与讨论

为比较不同开发强度对需调蓄水量及绿色设施调蓄水量的影响,在方案1下计算L小区和H小区单位用地面积需调蓄水量及绿色设施调蓄水量。结果表明,对于L小区,单位用地面积的绿色设施调蓄水量为 $13.81 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{m}^2$,当年径流总量控制率分别为55%、75%和85%时,单位用地面积需调蓄水量分别为 5.67×10^{-3} 、 11.7×10^{-3} 、 $17.7 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{m}^2$;对于H小区,单位用地面积的绿色设施调蓄水量为 $1.80 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{m}^2$,当年径流总量控制率分

别为55%、75%和85%时,单位用地面积需调蓄水量分别为 9.44×10^{-3} 、 19.5×10^{-3} 、 $29.5 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{m}^2$ 。可知,在55%的年径流总量控制率下,L小区单位用地面积需调蓄水量为H小区的60%左右,但单位用地面积绿色设施调蓄水量为H小区的7.67倍。L小区的单位用地面积绿色设施调蓄水量能够满足55%及75%年径流总量控制率下的单位用地面积调蓄要求,但H小区的单位用地面积绿色设施调蓄水量远低于各年径流总量控制率下的单位用地面积调蓄要求。随着年径流总量控制率的增加,H小区单位用地面积需调蓄水量变化的斜率显著高于L小区,说明开发强度越高则需调蓄的水量就越多,而绿色设施能够调蓄的水量就越少,需要增加灰色设施进一步调蓄。

L小区和H小区开发强度的显著差异使绿色-灰色耦合雨洪调蓄系统在这两个小区的构建过程中有各自适宜的方案。对于L小区,通过增加下凹式绿地等具有调蓄功能的绿色基础设施的比例或增加绿色设施的调蓄深度,就能够满足高年径流总量控制率(85%)的调蓄要求。但对于H小区,方案2中通过大幅增加下凹式绿地等具有调蓄功能的绿色设施的比例,并增加绿色基础设施的调蓄深度,亦仅能够满足低年径流总量控制率(55%)的调蓄要求;但若要进一步满足较高年径流总量控制率的要求,必须通过增加灰色设施或降低小区综合径流系数的方式。根据方案3,降低H小区的综合径流系数对减少灰色设施的规模有显著作用。

针对H小区这类典型的高开发强度场地的雨洪管理,建设灰色设施以有效控制建筑小区的径流总量往往是必要的,无法以绿色设施所替代。但如何减少灰色设施的建设规模,充分发挥绿色设施的调峰、削峰功能是需要进一步讨论的问题。在方案3中,利用屋顶绿化降低了H小区的综合径流系数,是降低单位用地面积需调蓄水量的有效方法。在方案2的基础上,研究不同屋顶绿化比例对单位用地面积需调蓄水量的影响,结果见图2。可知,在不同年径流总量控制率下,屋顶绿化比例的提升均对降低单位用地面积需调蓄水量有显著作用;随着年径流总量控制率的提高,函数的斜率绝对值逐渐增加,从3.7054提升至11.617,充分说明屋顶绿化比例的提升对于降低高年径流总量控制率下单位用地面积需调蓄水量的效果更为显著。

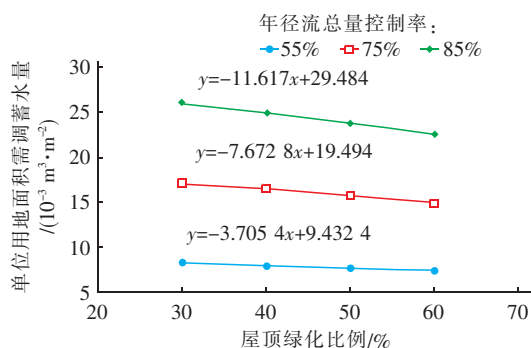


图2 不同年径流总量控制率下屋顶绿化率的影响

Fig.2 Effect of green roof ratio under different volume capture ratios of annual rainfall

4 结论

① 对于低开发强度小区,对具有调蓄功能的绿色设施进行合理规划和利用,即能满足85%年径流总量控制率下的调蓄水量要求,可以不用建设灰色调蓄设施。

② 对于高开发强度小区,仅通过绿色基础设施的调蓄难以满足75%以上的高年径流总量控制率下的调蓄水量要求,可以通过直接建设灰色设施来解决绿色基础设施无法满足的调蓄水量,也可以通过降低小区综合径流系数的方式来减少所需调蓄水量;另外,通过建设一定比例的绿化屋顶,能够明显降低单位用地面积需调蓄水量,且屋顶绿化比例的提升对降低高年径流总量控制率下需调蓄水量的效果更为显著。

参考文献:

- [1] 陈彦熹. 绿色建筑场地 LID 措施优化选择研究[J]. 绿色建筑,2014,(6):26-28.
Chen Yanxi. Study on optimization and choice of LID methodology in green building construction site [J]. Green Building,2014,(6):26-28(in Chinese).
- [2] 莫琳,俞孔坚. 构建城市绿色海绵——生态雨洪调蓄系统规划研究[J]. 城市发展研究,2012,19(5):136-140.
Mo Lin, Yu Kongjian. Structure the urban green sponge:

study on planning an ecological stormwater regulation system[J]. Urban Studies,2012,19(5):136-140(in Chinese).

- [3] Peng Z, Ma D. Brief analysis on rainwater regulation and storage for pressure alleviation of municipal drainage system[J]. Journal of Southeast University (English Edition),2014,30(2):202-205.
- [4] 宫永伟,李小宁,李俊奇,等. 建筑与小区雨水调蓄设施的径流控制效果分析[J]. 给水排水,2015,41(6):57-61.
Gong Yongwei, Li Xiaoning, Li Junqi, et al. Analysis on the performance of the runoff control for the rainwater storage facilities of buildings and residential districts[J]. Water & Wastewater Engineering,2015,41(6):57-61(in Chinese).
- [5] 车伍,张伟,王建龙,等. 低影响开发与绿色雨水基础设施——解决城市严重雨洪问题措施[J]. 建设科技,2010,(21):48-51.
Che Wu, Zhang Wei, Wang Jianlong, et al. Low-impact development & green rainwater infrastructure: Measures to solve serious urban stormwater problem[J]. Construction Science and Technology,2010,(21):48-51(in Chinese).



作者简介:陈彦熹(1986-),女,天津人,博士,高级工程师,主要研究方向为城市低影响开发雨洪管理模拟与优化、城市水体生态模拟与优化。

E-mail:chenyanxi@tju.edu.cn

收稿日期:2018-01-29