

建筑小区海绵城市建设中雨水系统设计方案的优化研究

冯磊, 徐得潜

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: [目的] 研究建筑小区海绵城市优化设计模型, 为建筑小区海绵城市设计与建设提供有益支撑。[方法] 在探讨外排径流系数、径流污染与海绵设施基础上, 以年费用最小和径流污染削减率最大为目标函数, 应用非线性规划建立建筑小区海绵城市双层耦合优化模型, 并以合肥市某区域海绵城市建设为例, 分析验证该模型有效性。[结果] 优化后, A 小区、B 小区与 C 小区的外排径流分别为 0.257、0.268、0.303; 总成本为 1.11×10^7 元, 年费用为 9.87×10^5 元; 径流污染削减率为 70.06%, 与原设计方案相比, 其经济效益和环境效益均有明显提高。[结论] 双层耦合优化模型应用于建筑小区海绵城市设计, 能有效降低年费用, 提高径流污染削减率, 使海绵城市设计与建设更加合理。

关键词: 建筑小区; 海绵城市; 雨水系统; 径流系数; 双层耦合模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)03-193-07

中图分类号: TU992

文献参数: 冯磊, 徐得潜. 建筑小区海绵城市建设中雨水系统设计方案的优化研究[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 193-199. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.027; Feng Lei, Xu Deqian. Optimization of stormwater system design scheme in sponge city construction of residential areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 193-199.

Optimization of Stormwater System Design Scheme in Sponge City Construction of Residential Areas

Feng Lei, Xu Deqian

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: [Objective] The model to optimize design of sponge city residential areas was established in order to provide beneficial support for the stormwater system design and construction such sponge city residential areas. [Methods] Based on discussions of outflow runoff coefficient, runoff pollution, and sponge facilities, and taking the minimum annual cost and maximum runoff pollution reduction rate as objective functions, a bilevel coupling optimization model of sponge city residential areas was established by nonlinear programming. Model validity was analyzed and verified by taking sponge city construction areas in a region of Hefei City as a case study. [Results] After optimization, the outflow runoff coefficients in communities A, B, and C were 0.257, 0.268, and 0.303, respectively. The total cost was 1.11×10^7 yuan, and the annual cost was 9.87×10^5 yuan. The runoff pollution removal rate was 70.06%, which significantly improved the economic and environmental benefits compared with the original design scheme. [Conclusion] The application of the bilevel coupling optimization model in the design of sponge city residential areas can effectively reduce the annual cost, increase the reduction rate of runoff pollution, and make sponge city design and construction more reasonable.

Keywords: residential areas; sponge city; stormwater system; runoff coefficient; bilevel coupling model

建筑小区海绵城市建设是海绵城市源头减排重要举措, 在海绵城市建设中占有重要地位。主要建设内容包括建筑小区海绵设施、雨水管网。建筑小区海绵措施及管网建设方案不同, 其外排径流系数、污染负荷削减率及市政雨水管渠建造费用也不同。因此,

有必要进行建筑小区外排径流系数与海绵措施优化设计研究。

针对建筑小区海绵城市设计, 国内外对此进行了大量研究。住房和城乡建设部于 2014 年颁布了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建

收稿日期: 2021-02-13

修回日期: 2021-03-21

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项“城市内涝风险评估与雨水排水系统优化设计研究”(21920150505)

第一作者: 冯磊(1993—), 男(汉族), 安徽省池州市人, 硕士研究生, 研究方向为市政工程。Email: 1336371164@qq.com。

通讯作者: 徐得潜(1960—), 男(汉族), 安徽省青阳县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事水资源利用与水环境保护、建筑给水排水工程、给水排水工程优化规划与经济运行方面的研究。Email: xudeqian60@163.com。

(试行)》^[1],从场地设计、建筑、小区道路与小区绿化 4 个方面说明建筑小区海绵城市设计原则及注意事项。中国工程协会于 2017 年发布了行业标准《建筑与小区低影响开发技术规程》^[2],提出在新建和改建建筑与小区低影响开发中,应综合考虑生态、经济、场地条件等因素,合理确定建筑小区海绵设施组合及配套管网规模。但这些指南、规程仅限建筑小区海绵城市相关设计原则,不能对具体设计与建设进行有效指导。深圳市住房和建设局于 2017 年发布了地方标准《深圳市房屋建筑工程海绵设施设计规程》^[3],根据建筑小区具体情况选定海绵设施,并对单体海绵设施进行技术说明。住房和城乡建设部于 2019 年发布了国家标准《绿色评价标准》^[4],规定下凹式绿地、雨水花园等有雨水调蓄功能的绿地和水体的面积之和占绿地面积的比例需大于 40%;硬质铺装地面中透水铺装面积的比例需大于 50%。但这些规程、标准只考虑单项海绵设施规模的确定及其说明,并未研究如何确定海绵设施组合系统。Fan R 等^[5]以成本效益为目标,确定最佳海绵化方案,以减少地表径流。黄均兆^[6]详细论述各类海绵措施类型、构造、经济性及应用条件,并分析不同单目标时,如何优选海绵措施。但这些研究仅限单个目标下优化海绵措施,并未涉及如何平衡建设费用与径流系数及径流污染控制优化问题,以及具体分析年成本、径流污染控制等多个目标情况下优化海绵措施。NgO T T 等^[7]使用“两阶段法”优化布局管渠系统,提高管渠系统经济效益;吴柱^[8]采用数学模型模拟建筑小区不同海绵城市建设方案的雨水产汇流情况,通过方案的结果比较进行优化设计;王媛媛等^[9]研究海绵城市起端——建筑小区低影响开发雨水系统设计原则、技术流程及设计要点。但这些研究仅限建筑小区海绵措施或管渠系统优化,都未充分考虑建筑小区内部设施建设与外部市政雨水管渠联系,从海绵城市总体布局优化建筑小区海绵设施、市政雨水管渠及外排径流系数。

本文以建筑小区外排径流系数为切入点,年费用最小和径流污染削减率最大为目标函数,基于建筑小区海绵城市建设和城市总体海绵城市建设,应用非线性规划建立建筑小区海绵城市双层耦合优化模型,对建筑小区外排径流系数和建筑小区海绵城市建设措施进行优化,并以合肥市某区域海绵城市建设为例进行计算分析,为建筑小区海绵城市设计与建设提供有益支撑。

1 建筑小区优化设计基础

在建立建筑小区海绵城市双层耦合优化模型之前,需对外排径流系数,径流污染,海绵设施等问题进行探讨。

1.1 外排径流系数

建筑小区外排径流系数是指在降雨形成高峰流量的历时内产生的外排径流量同降雨量的比值,取决于建筑小区地面覆盖的透水性、海绵措施、降雨历时及暴雨强度等因素,主要用于雨水设计流量计算,是海绵城市建设及雨水管渠系统设计的重要参数。建筑小区外排径流系数与传统的综合径流系数不同,它充分考虑了调蓄池等海绵设施对进入市政雨水管渠的设计流量的影响。

由于外排径流系数受多重因素影响,一般采用间接的方法推求,即用扣除平均损失强度进行计算^[10]:

$$\psi_k = 1 - \frac{\mu_k}{A} \tau_k^n \quad (1)$$

式中: ψ_k 为流量径流系数; μ_k 为产流期间总损失强度,是入渗强度 μ_1 与雨水利用强度 μ_2 之和(mm/h); A 为降雨历时为 1 h 的暴雨强度^[11](mm/h); τ_k 为降雨历时,包括地面集水时间 τ_1 和管渠流行时间 τ_2 (h); n 为暴雨强度衰减指数。

1.2 径流污染

初期雨水中含有大量的污染物质,雨水在汇流过程中,易产生径流污染。径流污染是海绵城市建设的一项重要控制目标,污染物指标一般有悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)等。在城市径流污染物指标中,SS 与其他指标具有一定相关性,且与建筑小区外排径流系数有关,故本文选用 SS 去除率作为污染物控制指标。

建筑小区 SS 总量去除率按下式^[11]:

$$C = \eta \frac{\sum F_h \varphi_h C_h}{F_z \varphi_z} \quad (2)$$

式中: C 为年 SS 总量去除率(一般取值 40%~60%^[11]); η 为年径流总量控制率; F_h 为单项海绵设施的汇水面积(m^2); φ_h 为单个地块综合雨量系数; C_h 为单项海绵设施对 SS 去除率,即针对年平均降雨量,在其汇水面积上产生的径流全部不外排,集蓄利用后所获得的去除率^[1]; F_z 为海绵设施汇水面积之和(m^2); φ_z 为建筑小区综合雨量径流系数。

1.3 海绵设施

海绵设施按其主要功能分为:①净化设施:绿色屋顶、雨水花园、生物滞留设施;②渗透设施:透水铺装、下沉式绿地、渗透塘、渗井;③调蓄设施:湿塘、雨水湿地、蓄水池、雨水罐、调节塘、调节池;④转输设施:渗管/渠、植草沟。以上单项设施可同时具有多种功能,如生物滞留设施具有调蓄、渗透功能,植草沟具有净化功能等。

海绵设施应综合考虑控制目标、排水分区情况、项

目周边用地性质与地形、空间大小、土壤渗透性、绿地率、水域面积率等条件确定海绵设施组合,海绵设施规模应根据控制指标及设施在具体应用中发挥的主要功能,选择容积法、流量法、水量平衡法等方法确定。

(1) 净化设施。宜先确定径流污染控制目标值,再分析各类净化设施对径流污染削减率,最后根据相关规范及小区具体条件确定净化设施规模。

(2) 渗透设施。透水铺装可通过参与综合雨量径流系数计算的方式确定其规模,对于下沉式绿地、渗透塘、渗井可按如下方法进行计算^[1]:

$$V_s = V - W_p \quad (3)$$

式中: V_s 为渗透设施的有效调蓄容积,包括设施顶部和结构内部蓄水空间的容积(m^3); V 为渗透设施进水量(m^3),用(4)式计算; W_p 为渗透量(m^3)。

(3) 调蓄设施。一般采用容积法计算蓄水设施设计调蓄容积^[1]:

$$V = 10H\varphi F \quad (4)$$

式中: V 为设计调蓄容积(m^3); H 为设计控制降雨量(mm/d); φ 为雨量径流系数; F 为汇水面积(hm^2)。

资料充足时,可结合水量平衡法进行精确计算,对容积进行合理调整。

(4) 转输设施。植草沟等转输设施设计目标通常为排除一定设计重现期下的雨水流量,可用推理公式计算一定重现期下的雨水流量^[12]:

$$Q = \psi q F \quad (5)$$

式中: Q 为雨水设计流量(L/s); ψ 为流量径流系数; q 为设计暴雨强度 $[L/(s \cdot hm^2)]$ 。

综上所述,净化设施采用径流污染控制目标法;渗透与调蓄设施选用容积法;转输设施规模选用流量法确定其规模。

2 建筑小区海绵城市双层耦合优化模型建立与求解

建筑小区海绵城市双层耦合优化模型是由上层模型与下层模型构成的多目标优化模型,上层模型是从海绵城市总体出发,对各建筑小区外排径流系数进行优化,下层模型是针对给定的外排径流系数对建筑小区海绵城市建设措施进行优化,两层优化通过建筑小区外排径流系数进行耦合。

2.1 建筑小区海绵城市建设措施优化模型

建筑小区海绵城市建设措施不同,单位投资的径流系数、污染负荷削减值也不同。当外排径流系数为定值时,以建筑小区各海绵设施的规模为决策变量,建立建筑小区海绵城市建设优化模型。

2.1.1 目标函数 建筑小区海绵城市优化目标函数

为建筑小区海绵设施与雨水管网年费用最小和径流污染削减率最大:

$$\begin{cases} \min X_{1k} = \frac{i(i+1)^{n_t}}{(i+1)^{n_t} - 1} (\sum_{h=1}^m W_h + \sum_{j=1}^N G_j L_j) \\ \max X_{2k} = \eta \frac{\sum_{h=1}^m F_h \varphi_h C_h}{F_z \varphi_z} \end{cases} \quad (6)$$

式中: X_{1k} 为 k 小区年费用,包括建造年均摊费和年维护费; X_{2k} 为 k 小区径流污染削减率; i 为社会折现率(%); n_t 为计算期,各项设施利用最小公倍数法选取统一计算期,并在建造费中考虑计算期较小设施的重复投资(a); m 为小区海绵设施数目; W_h 为小区海绵设施 h 总成本,包括建造费、计算期内维护费,元; G_j 为雨水管 j 单位管段总成本,包括建造费和计算期内维护费,元/ m (跌水井等构筑物总成本与管网及管渠规模有关,均摊到雨水管渠总成本中考虑); L_j 为第 j 管段的管长(m); N 为设计管段数;其他变量含义同前。

2.1.2 约束条件

(1) 外排径流系数小于等于规定值。

$$\psi_k = 1 - \frac{\mu}{A} \tau^n \leq \psi_0 \quad (7)$$

(2) 径流污染削减率约束^[2]。

$$40\% \leq C \quad (8)$$

(3) 各类海绵设施建设规模约束。

绿色屋面比例不低于可绿化屋面面积30%面积^[2]:

$$30\% S_h \leq S_1 \leq S_h \quad (9)$$

式中: S_h 为可绿化屋面面积(m^2); S_1 为绿色屋面面积(m^2)。

硬质铺装地面中透水铺装面积比例不宜低于50%^[4]:

$$50\% F_{yp} \leq S_2 \leq F_{yp} \quad (10)$$

式中: S_2 为透水铺装路面面积(m^2); F_{yp} 为小区硬质铺装地面面积(m^2)。

下沉式绿地占绿地面积比例不宜低于40%^[4]:

$$40\% F_{ld} \leq S_3 \leq F_{ld} \quad (11)$$

式中: S_3 为下沉式绿地面积(m^2); F_{ld} 为小区绿地面积(m^2)。

(4) 蓄水池容积应介于蓄水池最小、最大容积之间,根据可收集雨水量、回用水量,经技术经济分析后确定。

(5) 渗管(渠)、植草沟的长度之和应小于所需的最大转输距离,根据小区用地条件和各设施设置位置确定。

2.2 建筑小区外排径流系数优化模型

外排径流系数决定着建筑小区海绵设施规模、年费用及径流污染削减率,也决定着市政雨水管渠系统

的规模和投资。由于不同位置的建筑小区的外排径流系数对市政雨水管渠系统的规模影响不同,因此,应从全局出发,以建筑小区内部海绵设施、雨水管网与外部市政雨水管渠系统总年费用最小、径流污染负荷削减率最大为目标函数,优化各小区外排径流系数与海绵措施。

2.2.1 目标函数 以市政雨水管渠系统与建筑小区内部设施总年费用最小,径流污染削减率最大为目标函数,则有:

$$\begin{cases} \min Y_1 = \sum_{k=1}^K X_{1k} + Z_2 \\ \max Y_2 = \frac{\sum_{k=1}^K S_k X_{2k}}{S} \end{cases} \quad (12)$$

式中: Y_1 为建筑小区海绵设施、雨水管网与市政雨水管渠总年费用; Y_2 表示径流污染削减率; K 表示建筑小区数; Z_2 为市政雨水管渠年费用,其年费用计算公式同建筑小区雨水管网; S_k 为 k 小区面积 (m^2); S 为区域总面积 (m^2);其他变量含义同前。

2.2.2 约束条件

(1) 外排径流系数约束^[1]。

$$0.1 \leq \psi_k \quad (13)$$

建筑小区外排径流系数与海绵措施有关,是建筑小区海绵城市重要优化变量,由于本文是研究城市海绵城市建设总体最优,故在计算中不考虑外排径流系数最大值约束。

(2) 流量约束。

$$Q_{xy} = Q_{sy} + Q_{yp} = Q_{sy} + \alpha_k \psi_k q F_k \quad (14)$$

式中: Q_{xy} 表示小区下游市政雨水管段设计流量 (m^3/s); Q_{sy} 表示小区上游市政雨水管段设计流量 (m^3/s); Q_{yp} 表示小区外排设计流量 (m^3/s); α_k 为建筑小区雨水管道水流流态对设计流量的影响系数,当建筑小区雨水管网设计重现期与市政雨水管网设计重现期相同时,建筑小区雨水管道为重力流, $\alpha_k = 1$; 当市政雨水管网设计重现期高于建筑小区雨水管网设计重现期,建筑小区雨水管道为压力流, $\alpha_k = 1.2$ ^[13];其他变量含义同前。

(3) 其他约束^[14]。市政雨水管段设计流速应介于相应的管段最小、最大允许流速之间;设计管径应大于最小设计管径,并在管径允许集合内;设计坡度应在相应的管段最小与最大设计坡度的范围内。

2.3 模型求解

建筑小区外排径流系数决定着海绵设施的组成及规模,同时也决定着小区雨水管网、市政雨水管渠设计规模。通过优化市政雨水管渠沿线各建筑小区的外排径流系数对总年费用和污染负荷削减率进行权衡,合理确定小区海绵措施、雨水管网及市政雨水管渠设计规模。

为便于模型求解,对各建筑小区分别设若干外排径流系数,应用优化模型计算其年费用及径流污染控制率,并分别回归建筑小区海绵城市建设总年费用、径流污染削减率与外排径流系数方程,则公式(12)变为:

$$\begin{cases} \min Y_1 = \sum_{k=1}^K X_{1k}(\psi_k) + Z_2(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_K) \\ \max Y_2 = \frac{\sum_{k=1}^K S_k X_{2k}(\psi_k)}{S} \end{cases} \quad (15)$$

其约束条件见公式(13)~(14)。

针对本节建立的建筑小区海绵城市双层耦合优化模型,通过 MATLAB 进行编程实现模型的粒子群优化求解,主要步骤如下:①分别拟合各小区海绵城市建设年费用、径流污染削减率与外排径流系数方程,设置算法参数^[15];②对粒子群位置与速度进行随机初始化;③计算每个粒子适应度,并更新粒子自身历史最优值、全局最优值、速度和位置;④若达到终止条件,则输出优化计算结果,否则转向步骤③。

3 实例分析

3.1 基本资料

如图 1 所示,合肥市某段市政雨水管渠上接有小区 A、小区 B 与小区 C 雨水排放,其中市政雨水管渠 1[#]—2[#] 长 450 m,市政雨水管渠 2[#]—3[#] 长 530 m,市政雨水管渠 3[#]—4[#] 长 300 m,各小区用地规划方案见表 1。

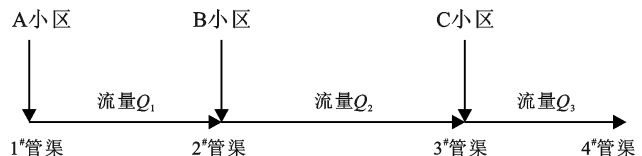


图 1 合肥市样本建筑小区与市政管渠示意图

表 1 样本建筑小区用地规划方案

建筑小区	占地面积/ m^2	屋面面积/ m^2	绿地面积/ m^2	人行道、广场及 停车场面积/ m^2	道路面积/ m^2	小区下游市政雨 水管渠长/m
A	43 182	8 518	18 535	6 758	9 371	1 280
B	51 185	9 865	23 902	7 068	10 350	830
C	80 591	12 980	34 211	13 360	20 040	330

合肥市位于长江中下游,属于亚热带季风湿润气候,雨量较为丰富,境内有巢湖及南淝河等水系;但人均水资源低于全国平均水平,水污染状况不容乐观,属资源性和水质性缺水城市,且降雨主要集中于夏季,易发生内涝。根据合肥市水资源特点,其建筑小区海绵设施主要采用绿色屋顶、下沉式绿地、蓄水池、透水铺装、植草沟等海绵设施,绿色植物选取本土植物。其中绿色屋顶、下沉式绿地、蓄水池及透水铺装可有效降低径流总量和径流峰值,减少径流污染,进行雨水利用,植草沟可净化雨水水质。根据海绵设施建设要求及小区用地条件确定各类海绵设施规模最大、最小限值。小区雨水管与市政雨水管渠管材均采用钢筋混凝土管。

合肥市现行暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{4\ 849.675(1+0.846\lg P)}{(t+19.1)^{0.896}} \quad (16)$$

根据此公式确定 $n = 0.896$,建筑小区雨水管网设计重现期与市政雨水管网相同,取 2 a, $A = 43.63$ mm/h。雨水径流总量控制率为 85% 时,设计控制降雨量 H 取 31.4 mm^[16]。使用合肥市 1951—2019 年逐日降雨量统计数据,设计重现期 2 a 时,最大 24 h 降雨量为 83.44 mm, $\mu_1 = 1.3$ mm/h, $\tau_1 = 10$ min^[17];社会折现率取 8%,计算期取 30 a^[18]。

3.2 海绵城市优化设计

设建筑小区外排径流系数依次为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 根据海绵设施、雨水管网约束条件与相关规范标准,优化计算出各小区年费用及径流污染削减率。

根据计算结果,使用 MATLAB 分别拟合各小区年费用与外排径流系数关系,各小区径流污染消减率与外排径流系数关系见图 2 和图 3。

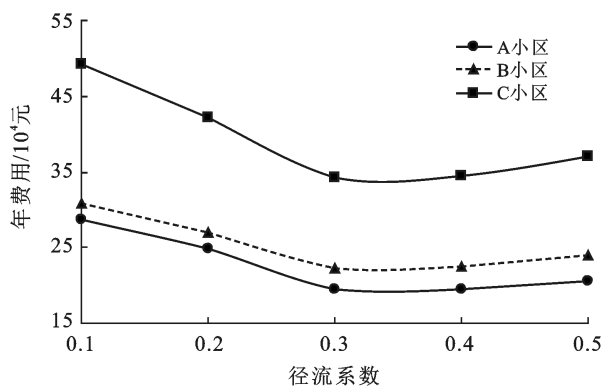


图 2 年费用与外排径流系数关系

如图 2 所示,小区海绵设施年费用随外排径流系数增大而减小,小区雨水管网年费用随外排径流系数增大而增大。由图 2 可知,当外排径流系数从 0.1 变

化到 0.3 时,海绵设施规模主导小区年费用变化,各小区年费用随外排径流系数增大而减小;但外排径流系数从 0.3 变化到 0.5 时,由于受各海绵措施最小规模约束,小区雨水管网规模主导小区年费用变化,各小区年费用随外排径流系数增大而增大,且 A, B 小区与 C 小区外排径流系数相同时, $X_{1C} > X_{1B} > X_{1A}$,这是由于 C 小区占地面积最大,其海绵设施与雨水规模也最大, A 小区占地面积最小,其海绵设施与雨水管网规模也最小所引起的。由图 3 可知,径流污染削减率随外排径流系数增大而减小,且 A, B, C 小区外排径流系数相同时, $X_{2B} > X_{2A} > X_{2C}$,这是由于 B 小区绿地面积占小区总面积最大, C 小区绿地面积占小区总面积最小所造成的。

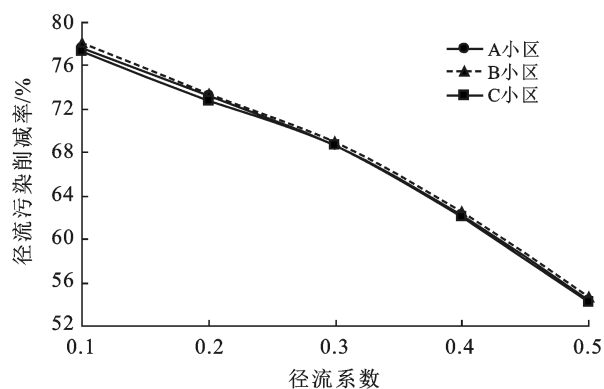


图 3 径流污染削减率与外排径流系数关系

由拟合曲线分别确定各小区年费用、径流污染削减率与外排径流系数拟合方程如下:

$$\begin{cases} X_{1A} = 199.2\psi_A^3 - 68.54\psi_A^2 - 41.15\psi_A + 33.55 \\ X_{2A} = -77.75\psi_A^{1.66} + 79.06 \\ X_{1B} = 177.5\psi_B^3 - 49.46\psi_B^2 - 42.72\psi_B + 35.54 \\ X_{2B} = -76.26\psi_B^{1.62} + 79.62 \\ X_{1C} = 275.8\psi_C^3 - 50.54\psi_C^2 - 85.61\psi_C + 58.22 \\ X_{2C} = -77.20\psi_C^{1.66} + 78.77 \end{cases} \quad (17)$$

建筑小区原设计方案中绿色屋顶占屋面面积 30%;下沉式绿地占绿地面积 40%;透水铺装占人行道、广场及停车场面积 50%,采用公式(4)确定蓄水池规模,计算出 $\psi_A = 0.405, \psi_B = 0.396, \psi_C = 0.421$; $Y_1 = 1.04 \times 10^6$ 元; $Y_2 = 61.39\%$ 。利用拟合方程,对各小区海绵措施分别进行优化,优化后, $\psi_A = 0.273, \psi_B = 0.278, \psi_C = 0.270$; $Y_1 = 1.02 \times 10^6$ 元; $Y_2 = 70.01\%$;在此基础上,结合外排径流系数与市政雨水管渠关系对总体海绵城市进行优化,最终确 $\psi_A = 0.257, \psi_B = 0.268, \psi_C = 0.303$; $Y_1 = 9.87 \times 10^5$ 元, $Y_2 = 70.06\%$,则该区域海绵城市优化设计方案见表 2。

表 2 海绵城市优化设计方案

外排径流系数	类别	设施	规模	总成本/ 10 ⁴ 元	年费用/ 10 ⁴ 元	径流污染 削减率/%	
0.257	A 小区海绵设施	绿色屋顶	3 070 m ²	61.40	5.45	71.32	
		下沉式绿地	8 458 m ²	38.06	3.38		
		蓄水池	400 m ³	40.00	3.55		
		透水铺装	5 202 m ²	67.63	6.00		
		植草沟	565 m	6.50	0.58		
	A 小区雨水管网	DN400 钢筋混凝土管	394 m	17.43	1.55		
		DN500 钢筋混凝土管	197 m	10.55	0.94		
		DN600 钢筋混凝土管	20 m	1.17	0.10		
	0.268	B 小区海绵设施	绿色屋顶	3 223 m ²	64.46	5.72	71.25
			下沉式绿地	10 703 m ²	48.16	4.27	
蓄水池			483 m ³	48.30	4.29		
透水铺装			4 852 m ³	63.08	5.60		
植草沟			605 m	6.96	0.62		
B 小区雨水管网		DN500 钢筋混凝土管	432 m	21.65	1.92		
		DN600 钢筋混凝土管	216 m	12.16	1.08		
		DN700 钢筋混凝土管	20 m	1.32	0.12		
0.303		C 小区海绵设施	绿色屋顶	3 894 m ²	77.88	6.91	68.62
			下沉式绿地	14 025 m ²	63.11	5.60	
	蓄水池		806 m ³	80.60	7.16		
	透水铺装		7 865 m ²	102.25	9.07		
	植草沟		922 m	10.60	0.94		
	C 小区雨水管网	DN500 钢筋混凝土管	546 m	29.24	2.59		
		DN700 钢筋混凝土管	273 m	18.05	1.60		
		DN800 钢筋混凝土管	20 m	1.45	0.13		
	市政雨水管渠	DN700 钢筋混凝土管	450 m	57.80	5.13		
		DN900 钢筋混凝土管	530 m	98.98	8.78		
DN1000 钢筋混凝土管		300 m	63.41	5.62			
总 计			1 112.20	98.70	70.06		

由各小区用地规划方案(表 1)及建筑小区海绵城市优化前后设计方案(表 2)计算结果可知,汇水面积越大则蓄水池及雨水管渠规模越大,绿色屋顶、下沉式绿地、透水铺装、植草沟规模分别与屋面面积、绿地面积、人行道、广场及停车场面积、道路面积呈正相关。优化前原设计方案建筑小区外排径流系数在 0.4 左右,且绿地面积占小区用地面积越大则该小区外排径流系数越

小;单个建筑小区海绵措施优化后小区外排径流系数明显减小,各小区外排径流系数在 0.27 左右;总体海绵城市优化后市政管渠上游小区外排径流系数小于各小区分别优化后所对应的小区外排径流系数,下游则相反。优化前后管网以及海绵设施年费用见表 3。由年费用变化可知优化后小区雨水管网及市政雨水管渠规模减小,海绵设施规模和径流污染削减率均增大。

表 3 优化前后管网以及海绵设施年费用

设计方案	A 小区		B 小区		C 小区		市政雨水管渠 年费用
	管网年 费用	海绵设施 年费用	管网年 费用	海绵设施 年费用	管网年 费用	海绵设施 年费用	
原方案	3.03	16.50	3.32	19.06	5.60	29.58	26.74
单小区优化方案	2.61	18.34	3.15	20.38	4.30	32.20	20.52
总体优化方案	2.59	18.96	3.12	20.50	4.32	29.68	19.53

总体海绵城市优化结果优于单个建筑小区海绵措施优化,且与原设计方案相比,经济效益提高

5.10%,环境效益提高 14.13%,综合效益明显提高。优化后市政雨水管渠与小区管网年费用减小,建筑小

区海绵措施年费用变大,由此导致环境效益变化较经济效益变化更明显。总体海绵城市优化后,C小区雨水管网与海绵设施规模最大,B小区次之,且表2中建筑小区海绵设施规模、雨水管网及市政雨水管渠设计管段管径、流速与坡度以及径流污染削减率等计算结果均满足合肥市海绵城市专项规划^[16]及室外排水设计规范^[17]等相关规划与规范要求,为该区域海绵城市设计最优方案。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 总体海绵城市优化后各小区海绵设施年费用需 6.91×10^5 元,但径流污染削减率达 70% 以上,在水生态、水安全、水资源等方面也都具有可观的间接价值,需加快将海绵城市建设落实到相关规划中,全面推进区域海绵城市建设。

(2) 基于海绵城市总体成本最小计算的市政雨水管渠上游建筑小区外排径流系数小于市政雨水管渠下游建筑小区外排径流系数,上游单位面积建筑小区的海绵设施建设费用明显大于下游,这造成区域整体的经济性与建筑区间公平性之间矛盾,可考虑下游小区对于上游小区适当经济补偿。

(3) 海绵城市建设受多重控制目标影响,运用多目标优化有利于获取最大综合效益。在《绿色建筑评价标准》^[4]中主要根据单项海绵设施规模进行打分,建议增加优化海绵设施组合规模内容及多项复合打分有关内容。

(4) 限于文章篇幅及相关数据可获性,本文未充分比较各城市降雨特性、土壤特性及控制目标不同所造成的海绵化建设具体差异性 & 特色性。因此,之后研究可充分讨论不同区域海绵城市建设差异性 & 特色性,将城市区域位置纳入到模型分析中,对双层耦合模型的目标函数与约束条件进一步优化,增强模型的实用性。

4.2 结论

(1) 与原设计方案及单个建筑小区海绵城市优化方案相比,总体海绵城市优化能明显提高综合效益。在海绵城市建设中,应依据城市总体规划及相关控制性详细规划,结合城市雨水管渠布置,以海绵城市总体优化为目标,进行各建筑小区海绵城市优化设计。

(2) 传统的建筑小区综合径流系数是根据地面覆盖类型及其面积,通过加权平均计算而得,未考虑雨水调蓄池等海绵设施对小区综合径流系数的影响。本文提出的外排径流系数全面考虑了地面覆盖类型

及其面积、海绵设施类型及其规模对径流系数的影响,根据外排径流系数能准确计算小区进入市政雨水管网设计流量。

(3) 通常情况下,建筑小区的雨水设计重现期小于市政雨水管渠设计重现期。出现这种情况,在进行市政雨水管渠设计时,可用压力系数法计算小区雨水管网设计流量,以避免市政雨水管网设计规模偏小、产生内涝。

(4) 为便于比较分析不同海绵设施的总成本,本文利用计算期最小公倍数法选取统一计算期,并将海绵设施与管网计算期内维护费按相应设施建设投资费用的一个固定比率进行计算,将其纳入到总成本中。

(5) 应根据当地降雨特性、水资源条件、水污染状况及社会经济发展水平等因素,进行海绵城市建筑小区建设。合肥市属于资源性和水质性缺水城市,应兼顾径流污染控制、雨水利用和内涝防治目标合理选择海绵措施,进行海绵城市建筑小区建设。

[参 考 文 献]

- [1] 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)[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [2] 中国工程建设标准化协会. T/CECS 469-2017 建筑与小区低影响开发技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [3] 深圳市住房和建设局. SJG 30-2017 深圳市房屋建筑工程海绵设施设计规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [4] 住房和城乡建设部. GB/T 50378-2019 绿色建筑评价标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [5] Fan Rong, Tong S T Y, Lee J G. Determining the optimal BMP arrangement under current and future climate regimes: Case study [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017,143(9):9-15.
- [6] 黄均兆.建筑小区海绵城市设计思考与建议[J].四川建筑,2019,39(3):56-57.
- [7] Ngo T T, Jung D, Kim J H. Robust urban drainage system: development of a novel multiscenario-based design approach [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2019,145(7):1-10.
- [8] 吴柱.基于 SWMM 的建筑小区海绵城市方案设计研究[J].福建建设科技,2019(6):99-102.
- [9] 王媛媛,高原,白伟岚.建筑与小区低影响开发雨水系统设计模式研究[J].给水排水工程,2019,3(35):181-191.
- [10] 西安冶金建筑学院,湖南大学.水文学[M].北京:中国建筑工业出版社,1979.

- [14] Silva C, Barbosa L. Cumulative effect of the disconnection of impervious areas within residential lots on runoff generation and temporal patterns in a small urban area [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 253:1-12.
- [15] Chigbu N, Okezie M, Arungwa I, et al. Comparative analysis of google earth derived elevation with in-situ total station method for engineering constructions [C] // *Geospatial information for a smarter life and environmental resilience*, Hanoi, Vietnam, 2019:118-136.
- [16] Wang Jinliang, Shao Jingan, Wang Dan, et al. Identification of the "source" and "sink" patterns influencing non-point source pollution in the Three Gorges reservoir area [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(10):1431-1448.
- [17] Zhu Kangwen, Chen Yucheng, Zhang Sheng et al. Identification and prevention of agricultural non-point source pollution risk based on the minimum cumulative resistance model [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23:e01149.
- [18] 王志芳,程可欣.北运河流域雨洪“源—汇”景观时空演变[J].*生态学报*, 2019, 39(16):5922-5931.
- [19] 牛振国,李保国,张凤荣.基于区域土壤水分供给量的土地利用优化模式[J].*农业工程学报*, 2002, 18(3):173-177.
- [20] Yu Qiang, Jiang Qun'ou, Yang Di, et al. Incorporating temporal and spatial variations of groundwater into the construction of a water-based ecological network: A case study in Denko County [J]. *Water*, 2017, 9(11):864.
- [21] 魏伟,雷莉,范雯,等.基于累积耗费距离理论的石羊河流域水土资源优化配置[J].*生态学杂志*, 2015, 34(2):532-540.
- [22] 金妍,车越,杨凯.基于最小累积阻力模型的江南水乡河网分区保护研究[J].*长江流域资源与环境*, 2013, 22(1):8-14.
- [23] 陈裕婵,张正栋,万露文,等.五华河流域非点源污染风险区和风险路径识别[J].*地理学报*, 2018, 73(9):1765-1777.
- [24] 戴璐,刘耀彬,黄开忠.基于 MCR 模型和 DO 指数的九江滨水城市生态安全网络构建[J].*地理学报*, 2020, 75(11):2459-2474.
- [25] 周向阳,张荣,雷文娟.极端降水事件概率分布识别方法对比研究[J].*自然灾害学报*, 2018, 27(5):158-168.
- [26] 袁钟,赵牡丹,刘蕊娟.基于最小成本距离与改进引力模型的城市绿地网络构建与优化[J].*陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(2):104-109.
- [27] 黄河,余坤勇,高雅玲,等.基于 MSPA 的福州绿色基础设施网络构建[J].*中国园林*, 2019, 35(11):70-75.
- [28] 胡明星.基于 GIS 的可达性和空间自相关分析在江阴绿地系统规划中的应用[J].*中国园林*, 2010, 26(9):20-24.
- [29] 朱捷,苏杰,尹海伟,等.基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建[J].*自然资源学报*, 2020, 35(8):1986-2001.
- [30] 秦飞,陈品祥,杨伯钢,等.无障碍设施空间布局核密度热点探测和空间自相关分析:以北京市核心区室外公共空间为例[J].*测绘通报*, 2020(9):140-142.
- [31] 李致家,于莎莎,李巧玲,等.降雨—径流关系的区域规律[J].*河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(6):597-604.

(上接第 199 页)

- [11] 梁忠民,钟平安,华家鹏.水文水利计算[M].2 版.北京:中国水利水电出版社,2008.
- [12] 李树平,刘遂庆.城市排水管渠系统[M].2 版.北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [13] 邓培德.特殊地区的雨水沟道最大径流量计算[J].*给水排水*, 1985, 05(2):10-14.
- [14] 严煦世,刘遂庆.给水排水管网系统[M].3 版.北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [15] 汪定伟,王俊伟,王洪峰,等.智能优化方法[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [16] 合肥市规划局,合肥市城乡建委,深圳市城市规划设计研究院,等.合肥市海绵城市专项规划(2016-2030)[S], 2017.
- [17] 住房和城乡建设部. GB 50014-2006(2016 版)室外排水设计规范[S].北京:中国计划出版社,2016.
- [18] 张勤,梁建军,张国珍.水工程经济[M].2 版.北京:中国建筑工业出版社,2019.