

基于多目标粒子群算法的 LID 设施优化布局研究

陈前虎¹, 邹澄昊¹, 黄初冬¹, 彭祖平¹, 王贤萍²

(1. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 嘉兴市规划设计研究院有限公司, 浙江 嘉兴 314050)

摘要: 针对当前建筑小区在海绵化改造过程中存在的决策目标单一、技术方法落后等问题, 尝试以成本、水量和水质为控制目标建立雨水调控多目标优化模型, 并运用粒子群算法对优化模型进行求解。在此基础上, 将研究成果应用到嘉兴市新城区某已开发建设的海绵设施改造示范小区中, 并与传统手段的规划方案进行比较, 发现优化模型在规划效率、经济性、水质水量削减率和低影响开发(LID)设施布局优化等方面都具有显著优势, 可为建筑小区海绵化改造方案设计提供技术支持。

关键词: 建筑小区; 低影响开发设施; SWMM; 粒子群优化算法; 海绵城市

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)19-0126-07

Optimization of LID Facilities Layout Based on Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm

CHEN Qian-hu¹, ZOU Cheng-hao¹, HUANG Chu-dong¹, PENG Zu-ping¹,
WANG Xian-ping²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Jiaxing Planning and Design Research Institute Co. Ltd., Jiaxing 314050, China)

Abstract: Aiming at the problems of single decision-making and backward technical methods in the process of sponge transformation of the current building district, a multi-objective optimization model for rainwater regulation targeted at cost, water quantity and water quality control was established, which was solved by particle swarm optimization algorithm. On this basis, the results were applied to a demonstration district for the renovation of sponge facilities in the newly built urban area of Jiaxing City. Compared with the traditional planning schemes, it was found that the optimization model had obvious advantages in planning efficiency, economy, reduction rate of water quality & quantity and optimization of LID facility layout, etc., which could provide technical support for future design of sponge transformation scheme in building districts.

Key words: building district; low impact development facility; SWMM; particle swarm optimization algorithm; sponge city

随着城市化水平的不断提高,暴雨后引发的水文和水质问题愈发严重,传统城市排水系统面临严

峻考验。为了合理有效地管理城市雨水问题,以SWMM为代表的水文模型在城市低影响开发(LID)

设施布局及效果评价方面已得到广泛应用^[1]。然而,这种依赖水文模型的LID设施布局方法在实践中仍然存在一些需要改进与优化的地方。首先,在决策目标的选择方面^[2],已有研究与实践大多集中于对单一目标(如径流控制)改造效果的模拟与评价,但海绵城市作为一个综合性生态工程,其改造效果理应从多个方面进行考量,以满足现实中多维的工程设计目标要求;其次,在决策效率方面^[3-4],这种主要依靠手工布局的方法存在建模效率低下、难以穷尽潜在优化方案等问题,因此亟需寻求新的技术支持。近年来,通过数学建模进行工程优化已经成为解决上述两大问题的常用方法^[5-7],如章双双等人^[5]通过耦合SWMM模型与最优化目标函数,得出研究区内各类LID设施经济与效益的最优解。鉴于此,笔者尝试以成本、水量和水质为目标函数,以调蓄容积和设施规模为约束条件,建立雨水调控多目标优化数学模型,同时,利用面向多目标优化问题求解的粒子群算法与SWMM模型联合进行方案寻优,并将研究成果应用到嘉兴市新城区某已开发建设的海绵设施改造示范小区中,以期在当地LID设施的合理布局提供参考。

1 雨水调控多目标优化数学模型

1.1 优化的目标函数

为实现改建过程中降低造价,同时提升截污排涝能力的优化目标,本研究确立了3个目标函数。其中, f_1 为成本目标函数,是以年折算费用最小来确定LID设施合理规模的目标函数^[8]; f_2 为水量目标函数,用各排放口径流总量表达,通过调用SWMM源代码进行水力学模拟求值; f_3 为水质目标函数,由于TSS含量与COD、TN和TP均有显著的正相关性^[9],故本研究仅采用TSS这个污染因子代表地表径流的水质情况,通过调用SWMM源代码进行水力学模拟,得到特定降雨强度下各排放口TSS含量的模拟值。其相应的表达式为:

$$f_1 = \min \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \sum_{j=1}^m C_j + \sum_{j=1}^m W_j \right] \quad (1)$$

$$C_j = D_j S_j \quad (2)$$

$$W_j = B_j S_j \quad (3)$$

$$f_2 = \min \sum_{k=1}^N V_k \quad (4)$$

$$f_3 = \min \sum_{k=1}^N \text{TSS}_k \quad (5)$$

式中: i 为年利率,%; n 为计算期,年; m 为LID设施总数; C_j 为第 j 个设施的建造成本,元; W_j 为第

个设施的管理成本,元; D_j 为第 j 个设施的建造单价,元/ m^2 ; B_j 为第 j 个设施的年管理单价,元/ m^2 ; S_j 为第 j 个设施面积, m^2 ; k 为排放口编号; N 为排放口数; V_k 为各排放口径流总量, m^3 ; TSS_k 为各排放口TSS含量,kg。

以上3个目标函数都是越小越优型,但各目标之间既相互关联,又相互制约,因此往往不能同时得到满足。针对此类多目标优化问题,常见做法是根据决策者对不同目标的选择偏好赋予相应的权重系数,从而将多目标优化问题转化为单目标优化问题进行求解^[10]。值得注意的是,除了所有权重系数之和必须为1外,由于各目标之间不存在对应关系,因此还需要对其进行归一化处理,使得本没有联系的不同性质的数据可以放在一个公式中进行比较优化,其表达式如下^[11]:

归一化处理:

$$Y_i = f_i / \max f_i \quad (6)$$

加权确定总目标函数:

$$f = \min \sum_{i=1}^3 W_i Y_i \quad (7)$$

式中: Y_i 表示归一化后的指标值,在0~1之间; f_i 表示第 i 个目标的函数值; $\max f_i$ 表示第 i 个目标函数的最大值; W_i 表示相应的权重系数。

1.2 优化的约束条件

约束条件主要包括调蓄容积约束和设施规模约束。就调蓄容积约束而言,LID设施以径流总量和径流污染为控制目标进行设计时,研究区内需要调蓄的容积一般按下式计算:

$$V = 10H\varphi F \quad (8)$$

式中: V 为总调蓄容积, m^3 ; H 为设计降雨量,根据年径流总量控制率指标确定,mm; φ 为综合径流系数; F 为汇水面积, hm^2 。

根据所选LID设施的特点,设计降雨历时内LID设施的径流体积控制规模 V_j 可以分为以下几种情况计算:

① 入渗及渗滤设施的径流体积控制规模:

$$V_j = V_s + W_s \quad (9)$$

$$W_s = KJA_s t_s \quad (10)$$

式中: V_s 为设施有效调蓄容积, m^3 ; W_s 为设施降雨过程中的下渗量, m^3 ; K 为表层种植土的饱和渗透系数, m/h ; J 为水力坡度,一般取1; A_s 为有效渗透面积, m^2 ; t_s 为降雨过程中的入渗历时,h。

② 延时调节设施的径流体积控制规模:

$$V_j = V_s + W_p \quad (11)$$

$$W_p = (V_s / T_d) t_p \quad (12)$$

式中： W_p 为降雨过程中设施的排放量， m^3 ； T_d 为设计排空时间，根据保证 SS 去除率所需沉淀时间确定， h ； t_p 为降雨过程中的排放历时， h 。

经过海绵化改造后，所有 LID 设施径流体积控制规模之和应大于或等于研究区内需要调蓄的总容积，即 $\sum V_j \geq V$ 。

此外，由于所选 LID 设施功能特点、规模大小以及位置分布的不同，将直接或间接影响到工程成本及建筑小区水质、水量的处理效果，因此有必要将各类措施的规模进行约束。

根据《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2014)，下凹式绿地、雨水花园和透水铺装规模应满足以下要求：

$$0.3 F_{ld} \leq \sum (F_{xa} + F_{hy}) \leq F_{ld} \quad (13)$$

$$0.5 F_y \leq F_l \leq F_y \quad (14)$$

式中： F_{xa} 为下凹式绿地面积， hm^2 ； F_{hy} 为雨水花园面积， hm^2 ； F_{ld} 为小区绿地面积， hm^2 ； F_l 为透水路面面积， hm^2 ； F_y 为小区道路面积， hm^2 。

2 优化模型求解

近年来，随着计算机水平的不断发展，利用优化算法寻求模型最优解已经成为常用的技术手段。由于粒子群算法具有精度高、收敛快、参数调整简单等优点，因此尝试将其应用于 SWMM 模型的 LID 设施自动优化布局过程中。

为了使 LID 设施在优化布局过程中更加科学与高效，本研究在迭代寻优前，对研究区内的子汇水区划分、LID 设置原则、模型网络特点和设施规模大小作如下处理：①子汇水区划分。根据管网走向以及建筑物、绿地和街道的分布，采用人工方式划分子汇水区，其目的是在考虑实际雨水汇流的前提下，使每一个子汇水区仅含有一种用地类型。②LID 设置原则。由于每一种用地类型被细分为若干个子汇水区，因此在优化布局之前即可明确每个子汇水区实际采用的 LID 设施类型，如在屋面仅选择雨水桶作为改造措施，在道路仅选择透水路面作为改造措施，在小区门前绿化处仅选择下凹式绿地作为改造措施，而在大型绿化带内则选择雨水花园和下凹式绿地的组合形式进行改造。③模型网络特点。在 SWMM 模型中提供了两种方式添加 LID 设施，本研

究采用的是将预先定义好的 LID 设施直接运用到子汇水区内，若某汇水区在决策过程中添加了 LID 设施，则不改变其汇流方向和用地性质，但应注意子汇水区的参数（如特征宽度、不透水率）要在扣除 LID 设施面积后确定。④设施规模大小。为了降低程序运算时间以及避免子汇水区内由于改造面积过小而导致改造方案不符合实际施工特点的情况发生，本研究对需要改造的地块内嵌等面积的 LID 设施。特别地，由于雨水桶占地面积较小，所以在相应子汇水区内仅添加一个固定大小的雨水桶进行改造。

根据以上优化模型的特点，采用多目标粒子群优化算法，流程如图 1 所示。

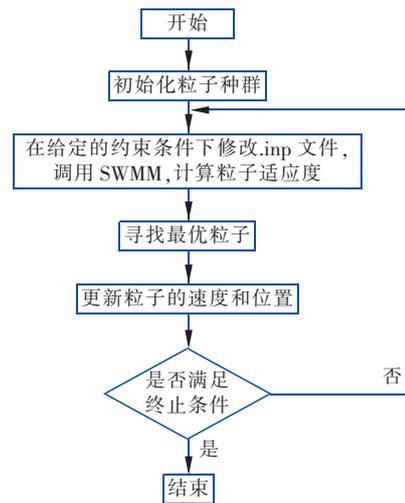


图 1 多目标粒子群优化算法流程

Fig. 1 Flow chart of multi-objective particle swarm optimization algorithm

① 初始化设置粒子群的规模、循环代数、加速系数、惯性权值、各粒子的初始速度和位置等。

② 在给定的约束条件下，通过修改 SWMM 模型中的输入文件（.inp 文件），对各粒子添加 LID 设施；随后调用输入文件的水力分析计算引擎完成延时模拟计算，并提取报告文件（.rpt 文件）中各汇水区的水质、水量数据；最后结合成本目标函数来评价各个粒子的适应值。

③ 对每个粒子，比较当前适应值和其个体历史最优解并对其进行更新；对比每个粒子的个体历史最优解，选择其中最优适应度粒子为群体历史最优解。

④ 更新各粒子的飞翔速度，并对更新后的速度进行限幅处理；同时更新粒子的位置，检验其是否

超过设计变量的取值范围。

⑤ 若满足迭代终止条件则算法终止,输出搜索结果,否则返回②继续搜索。

3 工程实例

3.1 研究区概况及常规改造方案

以嘉兴市新城区某已开发建设的LID示范小区为例,验证多目标粒子群算法应用于LID设施优化布局的合理性。小区总面积为 9.0 hm^2 ,其中陆地面积为 8.7 hm^2 。示范区内下垫面类型包括屋面、绿地和道路等,分别占陆地面积的28%、42%和30%。示范区内实行雨污分流,雨水从西北区、东南区和东北区三个主排放口就近排入河道,接出的管径分别为DN800、DN800和DN400。

根据当地规划设计院提供的竣工图统计,常规改造方案如下:研究小区采用雨落管断接方式,将屋面雨水引入周边绿地中进行下渗、净化处理,年折算成本为3万元;将小区内部分停车场、广场等改造为透水路面,提高雨水调蓄空间的联动性,年折算成本为54.86万元;将所有绿地设置为下沉式绿地、雨水花园等设施,收集、净化建筑屋面及硬化铺装的雨水径流,将现状雨水口移至绿地设施内的同时,在雨水管道排出口末端增设格栅除污井,年折算成本为91.87万元。

LID雨水系统的工艺流程如图2所示。

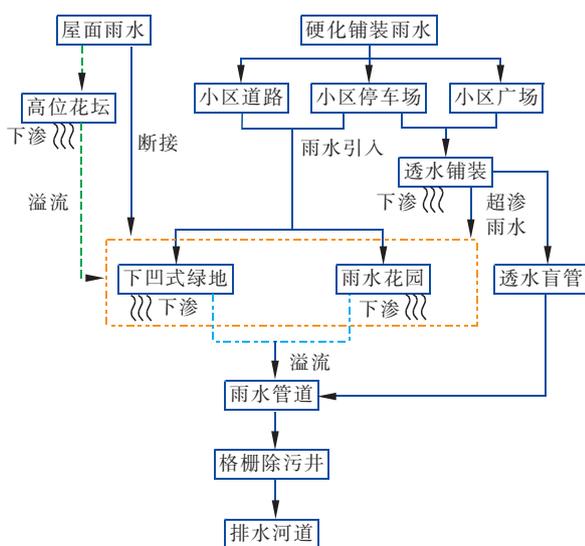


图2 LID雨水系统的工艺流程

Fig.2 Flow chart of LID rainwater system

3.2 模型构建

结合该小区的地形、现状雨水管网资料和实测

水质水量等数据,将研究区域人工划分为337个子汇水区,设置检查井节点410个、管段410个、末端排放口5个。

模型参数初始取值参考用户手册中的典型值及相关文献^[12],然后选取嘉兴市某雨量站2017年监测的6场降雨数据和相应的水质、水量数据进行率定与验证。其中,渗透模型选用Horton模型,最大和最小入渗率以及衰减系数分别为 40 mm/h 、 4 mm/h 和 4 h^{-1} ,透水和不透水地表曼宁系数分别为0.6和0.021、注蓄量分别为4和2.5 mm。汇流模型采用非线性水库模型,水力模型则采用动态波模型。水质模拟方面,地表污染物积累和径流冲刷模型分别选取饱和累计函数与指数冲刷函数。

设计降雨条件取重现期为5年、降雨历时为2 h的芝加哥雨型作为降雨输入,其中峰值比例 r 取0.4,降雨量为77.65 mm。嘉兴市暴雨强度公式为:

$$q = \frac{1773.8(1+0.675\lg P)}{(t+10.647)^{0.655}} \quad (15)$$

式中: q 为暴雨强度,mm/min; P 为设计降雨重现期,年; t 为降雨历时,min。

最后,结合实际调研情况选择透水路面、下凹式绿地、雨水花园和雨水桶等4种LID设施,分别针对道路、绿地和屋面进行水质和水量的调控。各类LID设施的设计参数见表1。

表1 各类LID设施的设计参数

Tab.1 Design parameters of LID facilities

项目	表层/mm	路面层/mm	土壤层/mm	蓄水层/mm	排水层
透水路面	—	210	—	150	有
下凹式绿地	50	—	300	10	无
雨水花园	300	—	300	—	无
雨水桶	—	—	—	1500	有

为便于分析,本研究共构建了3种不同情景下的模型:①传统开发模型,即按传统灰色基础设施建设思路进行开发、不采用LID设施的模型;②常规改造模型,即按LID理念手工进行规划设计的改造模型;③编程优化模型,即通过计算机程序在给定目标函数和约束条件下进行LID改造建设的模型。

3.3 优化设计参数

在成本目标函数中,取年利率为8%,计算期为10年,代入式(1)进行计算。在约束条件中,结合小区实际用地条件以及各类LID设施建设要求,确定调蓄容积约束和设施规模约束范围。①调蓄容积约

束:该小区计划改造后年径流总量控制率达到 80%,其对应的设计降雨量为 24 mm,在未进行海绵化改造前的综合径流系数为 0.64,最终得到所有 LID 设施径流体积控制规模之和应不小于 1 341 m³。②设施规模约束:下凹式绿地和雨水花园面积之和的最小规模为 19 452 m²,最大规模为 38 904 m²;透水路面最小规模为 11 855 m²,最大规模为 23 710 m²。

在用 MATLAB 编写程序时,设置初始种群数为 50,迭代次数为 100,根据当地实际改造需求,选取 3 组不同目标导向下的权重值作为编程优化方案,供当地决策者参考。其中,在成本目标导向下,成本、水量和水质的权重分别取 0.5、0.2 和 0.3;在水量目标导向下,相应权重分别取 0.2、0.5 和 0.3;在水质目标导向下,相应权重分别取 0.2、0.3 和 0.5。

3.4 优化结果分析

利用上述参数设置结果,得到不同偏好下的编程优化方案,并与传统开发模型及常规改造模型进行比较,探究不同 LID 组合方案在 5 年一遇降雨强度下的抗冲击能力,结果见表 2。

表 2 传统开发模型、常规改造模型及编程优化模型结果对比

Tab.2 Results comparison of traditional development model, conventional transformation model and programming optimization model

项 目	传统开发模型	常规改造模型	编程优化模型		
			成本导向	水量导向	水质导向
降雨总量/mm	77.65	77.65	77.65	77.65	77.65
地表径流量/mm	65.72	36.12	41.53	34.17	35.08
径流削减率/%	—	45.04	36.81	48.01	46.62
TSS 总量/kg	562.60	400.79	330.78	284.35	253.30
TSS 削减率/%	—	28.76	41.21	49.46	54.98
年成本/万元	—	149.73	134.92	183.23	181.65

注: 削减率为 LID 改造后的模型相对于传统开发模型的削减率。

由表 2 可知,经海绵化改造后的小区,其地表径流量和 TSS 总量较传统开发模式均有较大幅度的削减,这表明在不同的下垫面综合运用多种 LID 设施,可以有效提升改造区域内的抗冲击能力。比较常规改造方案与不同目标导向下的编程优化方案可以发现,常规改造方案主要侧重于对地表径流量的削减,但对 TSS 总量的削减效果并不理想,仅为 28.76%,

与优化方案差距甚远。而编程优化方案是在相应的决策偏好下提出的改造策略,它不仅具有良好的灵活性,而且还能结合实际改造需求,解决当地的主要矛盾。例如,成本导向下的优化方案相较于常规改造方案可以节省 14.81 万元的年成本,但截污减排能力较其他优化方案差。同理,水量导向下的优化方案侧重于对地表径流量的调控,水质导向下的优化方案侧重于对 TSS 总量的调控,但这两种调控方案都需要付出较大的年成本。

值得一提的是,由于嘉兴市的土质以淤泥质黏土为主^[13],渗透性普遍较差,加之当地的下凹式绿地平均仅下沉 50 mm,故其对水量的调蓄能力有限。因此,以水量控制作为改造目标时,虽然在径流削减率上较其他方案有所改进,但总体而言并没有达到理想效果。另外,嘉兴市地处长江三角洲冲积平原,地形平坦,河网密布,是典型的江南水乡城市;近年来,受工业化和城市化快速发展的影响,该市水环境问题日趋严重。为此,在选择改造方案时,应侧重于对水质的处理效果;而在水量控制方面,应充分利用小区周边的河网优势,将雨水尽量引导至河道内进行调蓄,从而避免因换土造成的额外成本。

4 LID 设施布局

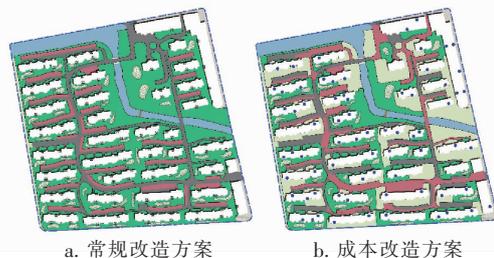
经编程优化后的 LID 设施规模大小和布局情况分别见表 3 和图 3。

表 3 建筑小区 LID 设施一览

Tab.3 LID facilities in building district

项目	LID 设施	LID 设施占下垫面比例/%			
		常规改造方案	编程优化方案		
			成本导向	水量导向	水质导向
绿地	下凹式绿地	91	48	62	53
	雨水花园	9	6	7	5
道路	透水路面	32	49	63	76
屋面	雨水桶	—	60	58	61
	雨水断接	100	—	—	—

注: 雨水断接和雨水桶为经 LID 改造后的屋面子汇水区和所有屋面子汇水区的比较。



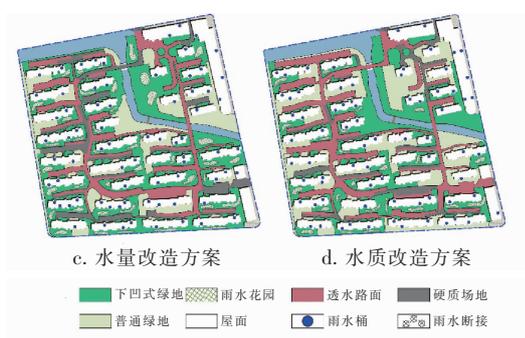


图3 建筑小区LID设施布局方案

Fig. 3 LID facilities planning in building district

由表3可知,在常规改造方案中,除了道路仅在局部区域进行改造外,绿地和建筑屋面均设置了相应的LID设施。而从其他3种编程优化方案可以看出,并非所有的下垫面都要建设LID设施,对某一类下垫面,只需添加一定比例的LID设施即可实现相应的改造目标。例如,以水质作为主要考虑因素时,由于透水路面的孔隙率较传统道路高且有专人进行定期清扫,因此,适当增加透水路面的比例将有助于对TSS含量的削减。总的来说,除了雨水花园宜分散布置且规模不宜过大外,其他各类设施占相应下垫面的比例大都在60%左右。

由图3可知,由于常规改造方案是将大部分下垫面进行海绵化处理,因此各类设施的布局特点完全取决于下垫面的分布情况,在看似规律的布局形态下往往难以贴合实际改造需求,缺少灵动性。而对于编程优化方案来说,无论是以何种偏好作为主导因素进行海绵化改造,它们都有一些共同的特点,那就是各类设施会相对集中于某些区域内,并且相互之间具有很强的连通性。这样做一方面能避免某些不必要的资源浪费,另一方面良好的连通性和聚集性可以大大增强建筑小区在不同降雨强度下的抗冲击能力,从而实现因地制宜的改造目的。

5 结论

海绵城市改造是解决雨水问题的重要途径之一,但盲目地进行规划设计容易造成资源浪费且效率低下;优化传统的规划设计思路与方法十分必要。本研究提出的优化思路和方法与传统规划手段相比,主要有两方面的优势:①从管理层面看,决策者可以针对改造区域内的主要问题与矛盾,综合考虑成本、水量和水质等因素,选择不同目标偏好下的决策方案,为因地制宜建设各类LID设施提供决策思

路;②从技术层面看,本研究利用面向多目标优化问题求解的粒子群算法与SWMM模型联合进行方案寻优,充分发挥了优化算法的高效性以及SWMM模型对城市雨洪系统的前瞻性,使得最终的决策结果更为科学合理。

然而,本研究还存在一定的不足和局限性。首先,针对老城区排水管网重现期普遍较低以及雨污合流的情况,可以将低影响开发措施和雨水管网系统优化设计结合在一起,通过相关规范和研究区域实际改造需求,选择合适的优化目标函数,从而获得更为系统、合理的规划方案;其次,对于面积较大、管道较多的区域,采用手动划分子汇水区的方式工作量巨大,使其适用性下降,这些有待进一步探索。

参考文献:

- [1] 赵冬泉,王浩正,陈吉宁,等. 城市暴雨径流模拟的参数不确定性研究[J]. 水科学进展,2009,20(1):45-51.
Zhao Dongquan, Wang Haozheng, Chen Jining, et al. Parameters uncertainty analysis of urban rainfall-runoff simulation[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(1):45-51 (in Chinese).
- [2] 王婷,刁秀媚,刘俊,等. 基于SWMM的老城区LID布设比例优化研究[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(4):39-43,128.
Wang Ting, Diao Xiumei, Liu Jun, et al. Optimization of LID layout proportions in old city area based on SWMM[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4):39-43, 128 (in Chinese).
- [3] 李思. 排水模型和LID技术在海绵城市中的应用[D]. 北京:清华大学,2015.
Li Si. Application of Drainage System Model and LID on Sponge City[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015 (in Chinese).
- [4] 胡爱兵,任欣欣,丁年,等. 基于SWMM的深圳市某区域LID设施布局与优化[J]. 中国给水排水,2015,31(21):96-100.
Hu Aibing, Ren Xinxin, Ding Nian, et al. LID facilities layout and optimization in an area in Shenzhen based on SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(21):96-100 (in Chinese).
- [5] 章双双,潘杨,李一平,等. 基于SWMM模型的城市化区域LID设施优化配置方案研究[J]. 水利水电技术,2018,49(6):10-15.
Zhang Shuangshuang, Pan Yang, Li Yiping, et al.

- SWMM model-based study on optimal allocation of LID facilities in urbanized region[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49 (6): 10 - 15 (in Chinese).
- [6] 刘标,李江云,常青. 基于雨洪模型的城市低影响开发设施的优化研究[J]. *中国农村水利水电*, 2017 (7):107 - 111,115.
Liu Biao, Li Jiangyun, Chang Qing. Optimization of urban low impact development facilities based on storm model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017 (7):107 - 111,115(in Chinese).
- [7] 徐得潜,余育速,汪维伟. 建筑小区雨水利用优化设计[J]. *中国给水排水*, 2017,33(1):131 - 135.
Xu Deqian, Yu Yusu, Wang Weiwei. Optimal design of rainwater utilization in buildings and communities[J]. *China Water & Wastewater*, 2017,33(1):131 - 135 (in Chinese).
- [8] 唐冬云. 基于海绵城市理念的城市雨水系统优化设计研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
Tang Dongyun. Research on Urban Storm Drainage System Optimization Design Based on Sponge City Concept[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017(in Chinese).
- [9] 唐文锋,胡友彪,何晓文,等. 淮南城区传统开发模式下雨水径流水质污染特征研究[J]. *环境工程*, 2017, 35(2):53 - 58.
Tang Wenfeng, Hu Youbiao, He Xiaowen, *et al.* Research on pollution character of rainwater runoff water quality based on the traditional development mode in urban area of Huainan[J]. *Environmental Engineering*, 2017,35(2):53 - 58(in Chinese).
- [10] 潘峰,李位星,高琪. 动态多目标粒子群优化算法及其应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2014.
Pan Feng, Li Weixing, Gao Qi. Dynamic Multi-objective Particle Swarm Optimizer Algorithm and Application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014 (in Chinese).
- [11] Ghodsi S H, Kerachian R, Zahmatkesh Z. A multi-stakeholder framework for urban runoff quality management: Application of social choice and bargaining techniques[J]. *Sci Total Environ*, 2016, 550: 574 - 585.
- [12] 李彦伟,尤学一,季民,等. 基于SWMM模型的雨水管网优化[J]. *中国给水排水*, 2010,26(23):40 - 43.
Li Yanwei, You Xueyi, Ji Min, *et al.* Optimization of rainwater drainage system based on SWMM model[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(23):40 - 43 (in Chinese).
- [13] 王贤萍. 嘉兴市海绵城市建设实践与探索[J]. *中国给水排水*, 2016,32(14):33 - 35,47.
Wang Xianping. Practice and exploration for sponge city construction in Jiaxing City [J]. *China Water & Wastewater*, 2016,32(14):33 - 35,47(in Chinese).



作者简介:陈前虎(1971 -),男,浙江浦江人,博士,教授,主要从事低影响开发及海绵城市相关研究。

E-mail:1147396290@qq.com

收稿日期:2019 - 03 - 07