

基于雨洪管理模型和 NSGA-II 算法的低影响开发设施空间布局优化 —— 以北京通州某住宅组团为例

The Spatial Optimization of LIDs Based on SWMM and NSGA-II Algorithm:
A Case Study of a Residential Group in Tongzhou District, Beijing

陈龙 龙瀛
Chen Long, Long Ying

摘要：作为城市重要组成单元，住宅区雨水系统的完善对建设“海绵城市”有着重要的意义。虽然国内外学者针对海绵城市低影响开发设施已开展诸多研究与讨论，但缺乏对区域内设施综合效益的评价方法，难以实现精细尺度下对低影响开发设施的科学与布局优化。本文以北京市通州区某新建住宅组团为例，提出基于雨洪管理模型与非支配排序遗传算法（NSGA-II）的低影响开发设施空间布局优化方法。通过构建研究区场地尺度雨洪管理模型，以低影响开发设施的位置和规模为决策变量，以建造成本、径流总量控制率和污染物去除率为多目标函数，模拟评估不同空间布局方案下的综合效益，提出低影响开发设施空间布局的优化方案。开展低影响开发设施空间优化方法研究，既为设施综合效益评估提供理论与方法支撑，也为海绵城市理念在城市规划设计中的应用提供实证案例，旨在提高城市整体规划的科学性与合理性，解决现阶段城市所面临的水资源难题。

Abstract: As an important component of cities, the improvement of residential area's stormwater system is of significance to sponge city construction. Although studies and discussions have been carried out by scholars around the world on low impact development (LID), but there is still lacking the comprehensive assessment and spatial optimization of the LID facilities. This paper focuses on the planning and spatial optimization of LID in a residential community in Tongzhou, Beijing. SWMM is selected as the monitoring tool, and NAGS-II algorithm is used for multi-objective optimization. By establishing the SWMM model of the community, the scale and location of the LID facilities are used as determinant variables, and the cost, flow volume and annual load of typical pollutants are calculated, analyzed, and compared. The approach could simulate and deliver pareto solutions for optimized layout of LID, which provides theoretical foundation and methodological reference for the comprehensive assessment of LID, and offers empirical evidence for urban planning under sponge city concept. This paper aims to improve the science and rationality of the comprehensive urban planning, and to solve the water problems faced by the city at this stage.

关键词：城市降雨径流；海绵城市；多目标优化；城市规划；低影响开发；雨洪管理模型；NSGA-II 算法

Keywords: Urban Stormwater Runoff; Sponge City; Multi-objective Optimization; Urban Planning; Low Impact Development (LID); Storm Water Management Model (SWMM); NAGS-II Algorithm

作者：陈龙，北京工业大学城市建设学部，讲师；交通工程北京市重点实验室龙瀛（通信作者），清华大学建筑学院，副教授；清华大学恒隆房地产研究中心数据增强设计研究室，主任；清华大学生态规划与绿色建筑教育部重点实验室，副主任。ylong@tsinghua.edu.cn

引言

快速城镇化带来的城市水资源、水生态、水环境等问题困扰着包括我国在内的诸多国家。多年来，城市研究者与规划实践者不断思考如何通过技术、政策等手段缓解城市水问题。欧美发达国家在此方面做了大量的研究和实践工作，也为我国解决此类问题提供了参考^[1-3]。我国于2012年首次提出“海绵城市”概念，旨在协调城市发展和环境资源的制约关系，增强生态环境的自然调节能力，统筹解决城市水问题。我国海绵城市建设中以低影响开发（LID: Low Impact Development）技术为核心支撑技术之一^[4-5]，即在城市开发建设过程中，通过源头控制的理念实现城市降雨径流的控制与利用，降低城市开发对自然水文过程的影响^[6]。大量研究表明LID设施能够提升城市对水资源的再利用能力，改善城市的内涝现象，降低洪水灾害发生的频次^[7]。

然而，不难发现目前学界的相关研究多围绕西方国家先进的雨洪管理技术而展开，我国对LID设施和海绵城市的理论和实证研究仍处在起步阶段。从海绵城市试点的工程实践来看，规划设计人员在开展海绵规划与改造过程中也缺乏有效的理论工具和技术手段来实现LID设施的高效配置。在国家大力推进海绵城市建设这一背景下，以住宅区这一LID设施主要载体为研究对象，深入探讨海绵城市建设中的规划与设施布局优化技术，一方面能够丰富海绵城市和城市规划的相关理论内容，为工程实践提供技术方法支撑，另一方面也有助于高效应对我国城市的水资源短缺、洪涝、

水环境、水生态等问题。这既是城市发展必须面对的难题，也是解决城市水问题的契机。

1 LID 设施研究与实践的现状和局限

LID 设施具有规模小、成本低且兼具生态效益等特点，十分适合与住宅区的规划建设相结合。欧美等发达国家经过多年的探索和实践，其雨洪管理政策已趋于完善并初见成效^[8]，在住宅区也率先开展了 LID 设施的研究与实践。其中较为经典的案例有瑞典马尔默市的 Augustenborg 生态小区^[9] 和美国西雅图 High Point 住宅区的改造^[10]。

随着海绵城市理念的提出，我国学者针对住宅区 LID 设施的筛选与优化也陆续展开了研究和讨论。其中，部分学者围绕 LID 设施的筛选展开了定性讨论，通过多层次筛选等方法提出 LID 设施在选址决策中的优先级^[11-12]。也有学者采用雨洪管理模型（SWMM: Storm Water Management Model）、城市暴雨处理及分析集成模型系统（SUSTAIN: System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration）等定量模型对 LID 设施的功效和海绵城市建设的核心指标进行评价，并通过模拟分析寻求 LID 设施的优化配置^[13-15]。

在 LID 设施效能的定量评估中，SWMM 被广泛用于模拟 LID 设施的径流控制与污染削减功效，但该模型的内置模块中缺乏多目标优化功能，因此很难评估 LID 设施的综合效益。随着计算机技术在多学科领域的快速发展，结合 SWMM 模型与计算机编程已使得 LID 设施的优化算法逐渐成熟，有学者开始尝试通过优化算法和 SWMM 模型耦合实现 LID 设施配置的多目标优化^[16-19]。

尽管模型算法逐渐成熟，我国在 LID 设施空间优化方面的研究仍有部分局限性。（1）在方法层面，SWMM 模拟中对汇水区的划分较为粗糙，一个汇水区内常包含多个功能地块，因此很难实现 LID 设施在场地尺度上的空间布局优化。（2）已有研究大多从环境科学视角出发，重点关注和讨论 LID 设施的效能评估和组合方式，寻求径流控制功效的成本一效益最大。但住宅区的海绵建设有其特殊性，LID 设施的选择和空间配置与小区内的建筑布局、道路规划、公共空间设计和景观规划有着密切的关系，而现有研究鲜有从城市规划与设计的视角讨论 LID 设施布局与住宅区规划设计的衔接。本文基于上述两项局限性，开展住宅区 LID 设施空间布局优化方法研究。

2 住宅区 LID 设施空间布局优化

2.1 研究区简介

本文选取了北京市通州区潞城镇新建住宅组团杨坨中区为研究对象。该住宅组团包含新建住宅楼 4 栋，位于西北侧

的配套设施，以及位于中部和东侧的幼儿园和小学，总建筑面积为 124 449.7 m²。

2.2 问题识别与优化原则

不同 LID 设施的选择和空间布局会直接影响雨水的入渗与径流，引发不同的水文过程，决定着区域的径流控制和污染削减功效。因此，LID 设施的空间布局优化可以转译为规划设计中的三个问题，即：选取哪类 LID 设施？这些 LID 设施的设计规模应为多大？规划在空间上的什么位置？同时，不同类型和规模的 LID 设施需要不同的初期建造成本和维护成本。在海绵城市的规划设计与工程建设中，我们往往要综合考虑多个目标，一般来说，在满足总体规划和径流控制率要求的基础上要实现成本降低与功效提升的“成本一效益”最优。此外，在规划设计过程中既要考虑国家和地方关于海绵城市建设的指导性意见，如住房和城乡建设部 2015 年印发的《海绵城市建设绩效评价与考核指标》，以及《北京市海绵城市专项规划》指标体系，也要考虑规划区的功能定位、区域特征等实际情况，如区域年径流总量控制率下的分区指标要求、区域和本底条件等。

基于上述问题识别和优化原则，本文提出基于 SWMM 模拟与非支配排序遗传算法（NSGA-II）这一多目标优化算法的 LID 设施空间优化方法。该方法通过将 LID 设施规模和空间位置作为决策变量，以建造成本、径流控制功效和污染物去除功效作为目标函数，采用 NSGA-II 对不同规模和空间位置下的 LID 规划场景进行上万次模拟，筛选符合目标函数的最优解集，以实现住宅区 LID 设施空间布局的优化。在实证研究中，本文通过对杨坨中区的实地勘测，结合市政管网数据、模型手册和文献资料得到模型的基础数据，借助城市暴雨管理模型 SWMM 模拟不同重现期下 LID 开发利用前后的产流情况，筛选合适的 LID 设施，并耦合 NSGA-II 多目标优化算法实现对住宅区 LID 设施空间布局的优化求解，以期海绵城市规划建设提供解决方案和技术参考，研究技术路线如图 1 所示。

2.3 基于 SWMM 的降雨径流模拟

由美国国家环境保护局（EPA: Environmental Protection Agency）研制的 SWMM 是目前在城市雨水径流模拟中使用最为广泛的一款软件。在 SWMM 中，用户通过输入研究区气象资料、下垫面特征等条件，可以实现对区域降雨事件中产流、汇流等过程的水文模拟。然而，当前采用 SWMM 进行雨洪管理的研究大多基于大尺度区域的降水过程模拟，在小尺度的研究和应用较少。本文采用 SWMM 评估了住宅区场地尺度的 LID 设施在不同空间布局方案下对降雨事件的径

流削减和污染物去除能力，为后续多目标优化提供数据和技术支撑。基于 SWMM 的研究区降雨径流模拟所需的基础数据见表 1。

该方法主要包括以下五个步骤。

(1) 研究区模型概化

根据模型模拟要求，在合理范围内对雨水管网和下垫面类型进行整合与概化，在真实反映现状的前提下简化系统，提高运行效率。对于雨水管网的概化，保留了管径或流向改变的节点、支管起始与汇入的节点，其余节点考虑管线长度，2~3 个合并为一个概化雨水井。此外，研究区域内雨水径流从进入管网至出水口的流行时间较短，污染物在管网中的衰减可忽略不计，因此将节点间的管道连接概化为虚拟连接，即仅考虑水流的传输，不考虑沿程或局部损失以及污染物的衰减，有效简化现有体系。对于下垫面的概化，主要依据不

同土地利用的特征，对其重新分组，整合为屋面、路面和绿地三种类型，在产流模块中分别定义其参数。遵循模型概化原则，本研究根据住宅区现有规划设计方案搭建了研究区的降雨—径流模拟模型（图 2）。

杨坨中区总面积 2.68 hm²，其中普通绿地 6 446 m²，硬质屋顶 4 260 m²，沥青路面 1 543 m²，硬化铺装 2 128 m²，现状海绵建设规划中，规划下凹式绿地 6 447 m²，规划透水铺装 5 962 m²，规划植草沟 382 m²。在利用 SWMM 进行降雨径流模拟之前，还需对研究区域进行汇水区的划分。分区主要依据土地利用的类型，以道路、屋顶边际等为界划分各汇水区，使得同一汇水区内的下垫面类型尽量单一、完整。同时，考虑排水体系，保证每个汇水区均有明确、唯一的排放路径。本研究的住宅区面积较小，且已经有初期设计方案^①，土地利用能精确到每一个具体的场地，因此以场地为集水单元，共划分

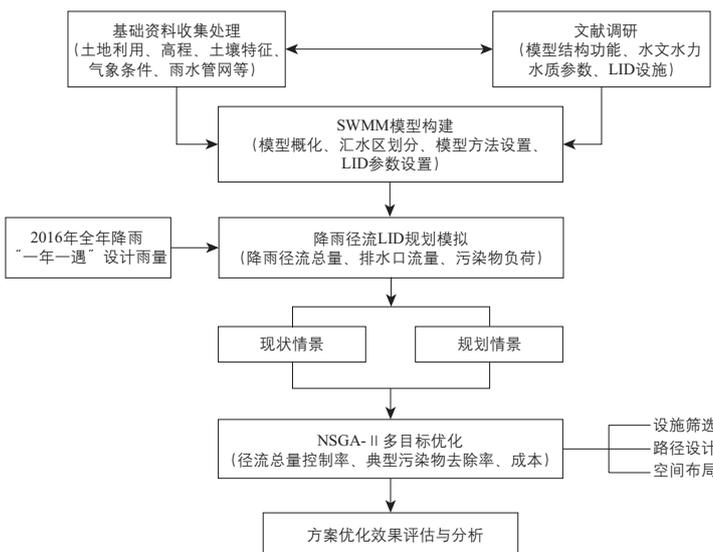


图 1 研究技术路线图

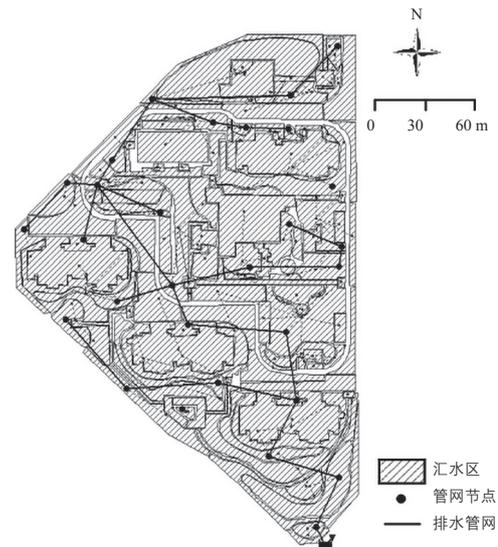


图 2 杨坨中区 SWMM 模型概化

表 1 杨坨中区 SWMM 构建所需基础数据

数据名称	数据描述	数据来源
土地利用类型图	下垫面土地利用类型信息，栅格 (image) 数据	北京城市副中心控制性详细规划
住宅区平面图	住宅组团总平面图，CAD 或栅格数据	住宅区建筑设计公司
数字地形图	栅格数据数字高程模型 (DEM)	地理监测云平台
雨水管网图	市政 (规划) 雨水管网的矢量数据	北京市通州区海绵办
降雨数据	2016 年每 5 分钟降雨量 (mm)，根据模型需要转化为 .dat 文件格式	北京市水文总站监测数据
气象数据	2016 年每日数据 (含温度、蒸发速率、风速等)，后根据模型需要转化为 .swm 文件格式	中国气象数据网
产流模块参数	水文水力参数、水质参数	本地或类似区域的文献参考
LID 特征参数	设施基本参数、单位造价等	《海绵城市建设技术指南》

① 详情请以手机扫描本文末页的二维码，在公众号“开放科学计划 OSID”中查看“本文开放的科学数据与内容”中的图 S1。

155 个汇水区。构建场地尺度的汇水区，一方面能更精准地模拟径流方向以及各汇水区与雨水管网的关系；另一方面，只有将场地这一最小设计单元作为多目标优化的决策变量单元，才能真正实现对 LID 设施的空间布局优化求解，而非在较大空间范围内计算不同 LID 设施规模的最优配比。

(2) 模型参数设定

SWMM 中产流的计算需确定透水区与不透水区的曼宁粗糙系数和初损填注深度，共四项水文水力参数。由于新建住宅区缺乏相关监测条件，本研究基于现有的基础资料，参考北京地区相关文献^[20,23]，合理选取了各参数值（表 2）。

对于下渗过程的模拟，选择广泛应用的 Horton 模型，即通过指数函数模拟降雨过程中渗透率的变化。根据研究区域土质条件，参考 SWMM 手册和本地文献^[15]，取土壤水力传导率 0.23 cm/h，吸水高度 29.5 mm，土壤初始湿度亏损值 0.28。

对水质的模拟包括污染物累积和冲刷两个过程^①。水质模块共需四类参数：最大累积量（max buildup）、累积常数（rate constant）、冲刷系数（coefficient）和冲刷指数（exponent），对应于路面、屋面、绿地三种用地类型和悬浮物（SS）一种典型污染物，具体参数设置见表 3。

(3) 降雨事件

模拟中的降雨事件分别由实测降雨数据和计算合成降雨数据生成。其中，实测降雨数据以北京市通州区 2016 年每 5 分钟降雨数据构成，总降雨量 680.6 mm，高于多年平均降雨水平 526.7 mm，属正常偏丰，雨量集中分布在 2 月、6—7 月和 9—10 月，与长期统计情况接近，具有一定的代表性。合成降雨数据则采用芝加哥降雨模型，利用北京市暴雨强度公式雨水设施选择“一年一遇”的 120 分钟降雨事件计算得出。气象数据为对应的 2016 年每日数据，由中国气象数据网（http://

www.cma.gov.cn）北京站的资料整理而得。获得的数据需按模型要求整理为 .dat 格式的降雨文件和 .swm 格式的气象文件。

(4) LID 设施选择

对于 LID 设施的选择，可针对环境效益、经济效益和社会效益等方面的指标展开分析和筛选，设施的选择遵循因地制宜、经济有效、方便易行的原则。对于住宅小区，所选设施不仅需要具有较强的径流流量和水质控制功效，还需要具有一定的景观效果，有较高的居民接受度。此外，城市中住宅区可供利用的空间较少，大型 LID 设施如人工湿地、雨水花园等虽效果突出，但应用受到限制。本研究区域内主要为建筑物、道路、停车场和小区绿地，不透水面积较大，根据《海绵城市建设技术指南》和试点城市的成功案例，对研究区土层条件、径流及污染物消减效果、建设费用和后期管理费用等综合考虑，初步筛选透水铺装和下凹式绿地两种 LID 设施对研究区进行海绵改造。LID 设施的单位建设成本参照《海绵城市建设技术指南》中对北京地区低影响开发单项设施单价的估算，以及北京城市副中心海绵城市规划项目中的工程造价估算，设定透水铺装单位造价为 200 元/m²，下凹式绿地单位造价为 40 元/m²。LID 设施的基础参数见表 4。

(5) 现状模拟结果

在模型概化和参数确定后，在 SWMM 中建立水文模型进行研究区域的降雨径流模拟与分析。模拟主要关注水量和水质两个方面，水量方面考察年径流总量控制率，水质方面则考察典型污染物 SS 的去除率。

以“一年一遇”120 分钟设计雨量为输入数据，在研究区开发后无 LID 设施的情景下，年径流总量控制率模拟结果为 67.81%；以 2016 年每 5 分钟降雨量为输入数据，研究区域在开发后无 LID 设施的情景下，年径流总量控制率模拟结

表 2 水文水力参数选取结果

参数名称	参数符号	量纲	取值
不透水区曼宁粗糙系数	N-Imperv	—	0.02
透水区曼宁粗糙系数	N-Perv	—	0.15
不透水区初损填注深度	S-Imperv	mm	0.76
透水区初损填注深度	S-Perv	mm	3.81

表 3 水质参数选取结果

用地类型	污染物	最大累积量 (kg/hm ²)	累积常数	冲刷系数	冲刷指数
路面	SS	223	0.5	0.010	1.0
屋面	SS	178	0.5	0.010	1.3
绿地	SS	71	0.5	0.001	1.1

表 4 LID 设施基础参数

LID 设施处理层	基础参数	透水铺装	下凹式绿地
表面层	蓄水深度 / mm	8	200
	曼宁系数	0.02	0.15
	地表坡度 / %	2	2
	路面厚度 / mm	150	—
铺装层	孔隙比 / %	20	—
	渗透性 / (mm/h)	65	—
	透土层厚度 / mm	—	400
土壤层	孔隙率 / %	—	50
	导水率 / (mm/h)	—	80
	导水率坡度	—	10

① 详见“本文开放的科学数据与内容”中对累计和冲刷过程的函数解释（请以手机扫描本文末页的二维码查看）。

果为 73.74%。二者均低于《海绵城市建设技术指南》对该区域的最低要求 75%，因此对研究区进行 LID 设施的规划和空间布局优化十分必要。

为了验证 LID 设施空间布局多目标优化的有效性，我们预设了若干典型情景并模拟区域径流控制功效。情景一和情景二基于《雨水控制与利用工程设计规范》（下称《规范》）中对下凹式绿地和透水铺装面积的限定，分别以下限及其 50% 作为研究区 LID 设施的布置规模。模拟结果显示，当按照《规范》要求实现下凹式绿地和透水铺装的下限规模 100% 时，研究区年径流总量控制率在两种降雨输入（“一年一遇”设计雨量输入和 2016 年降雨量输入）下将分别达到 86.01% 和 88.64%，相比未规划的情景有较明显的提升；即便是设计规模仅为下限规模的 50% 时，径流控制率相比未开发前也有较大提升。

我们进一步将每个场地的最大面积作为铺设 LID 设施的规模上限，设置情景三的模拟，结果显示在将各类 LID 设施铺满场地后，住宅区可实现的年径流总量控制高达 98.78% 和 99.21%。情境四则是在情景三的基础上减少 50% 的 LID 规模，同样实现了 90.16% 和 97.23% 的径流控制率（表 5）。

四种情景的模拟结果验证了我们的假设，即在住宅区可以通过优化 LID 设施的规模和空间布局来实现年径流总量控制率和污染物去除率的提升。同时，我们也注意到当径流控制率和污染物去除率发生变化时，其 LID 的建设成本并没有随之呈线性变化，意味着在增加径流控制与污染削减功效的同时，有途径寻求成本的降低，这也为后续进行多目标优化提供了实证基础。

2.4 基于 NSGA-II 算法的多目标优化

研究区现状以及不同规划情景下降雨径流控制功效的模拟结果验证了 LID 设施空间布局优化的可行性，也奠定了基于 NSGA-II 算法开展多目标优化的基本思路。NSGA-II 算法是德布等 (Deb et al.) 于 2000 年在 NSGA 的基础上提出的一种多目标优化算法，比 NSGA 算法更加优越^[24]。目标函数是决策变量的函数表达式，在 NSGA-II 算法中表示优化所追求的目标。在住宅区 LID 设施空间布局多目标优化中，我们追求以下三个目标：一是 LID 设施的建造成本最低；二是

建成后区域年径流总量控制率最高；三是区域内污染物（以 SS 计）去除率最高。基于以上三个目标，构建 NSGA-II 算法中的三个目标函数，依次为：

$$\text{Minimize } F_{(1)} = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n \quad (\text{建造成本最低})$$

$$\text{Maximize } F_{(2)} = \text{swmm}(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (\text{径流控制率最高})$$

$$\text{Maximize } F_{(3)} = \text{pollutant}(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (\text{污染物去除率最高})$$

$$X_i \in [0, S_{imax}] \quad (\text{LID 设施规模取值区间})$$

其中， X_i 为 LID 设施的布置规模， a_i 为 LID 设施的单位成本。

限制函数是对定义域，即决策变量的取值区间进行的约束。在实际工程设计中，要综合考虑场地条件、政策规范要求等要素，因此设定多目标优化中的限制函数为：

$$G_1(x) = S_{\text{下凹式绿地}} \geq 0.5 * S_{\text{绿地}}$$

$$G_2(x) = S_{\text{透水铺装}} \geq 0.7 * S_{\text{硬化路面}}$$

其依据是《雨水控制与利用工程设计规范》对新建海绵小区的相关规定，即新建住宅区内布置的下凹式绿地面积不得小于绿地总面积的 50%，透水铺装占比不得少于硬化路面面积的 70%。

为了实现不同规模和空间布局配置下的住宅区 LID 设施成本效益，本文基于 Python 平台在 NSGA-II 算法的代码中调用 SWMM 的径流和水质模拟模块以实现多目标优化求解。具体来说，首先在 Python 中调用 NSGA-II 算法，在设定目标函数时构建自定义函数以调用 SWMM 的降雨径流模拟和参数修改模块，随后设定决策变量及其取值范围，构建限制函数，选择 1 000 次随机模拟作为遗传算法的初始种群，并进行 200 代迭代模拟，最终得到最优解集，形成帕累托前沿面。

以杨坨中区初期设计方案为模型底图，以方案内已规划的 LID 设施类型和位置为参考，将下凹式绿地和透水铺装两种 LID 设施在各个汇水区的布设面积设定为决策变量，输入北京市“一年一遇”120 分钟降雨事件进行多次模拟，得到多目标优化下的帕累托前沿面（图 3）。由结果可知，不同 LID 设施空间布局的所有组合下，通过多目标优化得到的 100 个最优解，建造成本区间为 14.85 万~44.00 万元，可实

表 5 典型布置方案结果

模拟结果	规划前		情景一（100% 规模下限）		情景二（50% 规模下限）		情景三（100% 规模上限）		情景四（50% 规模上限）	
	一年一遇	2016	一年一遇	2016	一年一遇	2016	一年一遇	2016	一年一遇	2016
总建造成本 / 万元	0		65.37		32.68		82.18		41.02	
径流控制率 / %	67.81	73.74	86.01	88.64	81.71	86.52	98.78	99.21	90.16	97.23
污染物去除率 / %	54.25	58.99	75.89	79.30	70.44	79.56	85.70	86.23	80.44	80.46

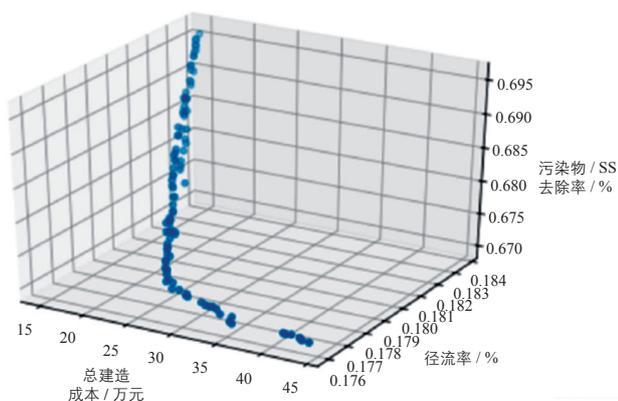
现的区域年径流总量控制率范围达到 81.63%~82.4%，污染物去除率达到 65.4%~65.90%。不难看出，相比杨坨中区的原规划方案，优化结果提供的方案组合可以通过更低成本获得较高的径流控制效果。例如：优化方案中仅需 25.02 万元就能实现 82.0% 的径流控制率，相比情景二花费 32.68 万元仅能实现 81.71% 的径流控制率有较为明显的提升^①。

特别需要注意的是，当目标函数的数量大于两个时，NSGA-II 算法无法计算得到唯一的最优解，而是生成由 100 种最优方案组成的帕累托前沿面。这意味着规划者往往需要额外的方案筛选，但同时也意味着拥有更多的选择和设计空间，即可以在保证海绵设施功效最大化的同时，充分考量规划设计中的其他要素和限制，让海绵理念（LID 设施空间布局优化）与住宅区规划设计（尤其是公共空间与景观设计）真正实现相互衔接。举例来说，在确定设计方案时，要综合考虑透水铺装的耐磨损程度和小区内公共空间的使用情况，尽量避免在人群密集、活动频繁的地区铺设透水铺装。同时，也应考虑下凹式绿地的布设位置与小区整体景观设计的融合和连贯性。

3 讨论与展望

3.1 模型和算法驱动下的住宅区 LID 设施空间布局优化

以北京市通州区某新建住宅组团为例，本文首先构建了场地尺度的 SWMM 模型，实现了对研究区不同 LID 设施规划情景降雨过程的水文模拟，获得了基于真实数据和模型计算的区域雨水径流控制效果。在此基础上，采用 NSGA-II 算法，构建建造成本、径流控制率和污染物去除率为多目标函数，在 Python 调用 SWMM 的水文模拟模块，以 LID 设施的规模和位置为决策变量进行多目标优化求解。



注：径流率 = 100% - 径流控制率

图 3 NSGA-II 优化帕累托前沿面

结果表明，通过调整不同 LID 设施的规模和空间布局，能够有效地实现 LID 设施的成本—效益优化，即用更低的成本达到预期的径流控制功效。以住宅区为例开展实证研究，验证了场地尺度 LID 设施空间布局优化方法的适用性和有效性，一方面暴露了现有规划和设计对 LID 设施综合效益评估和配置优化的考量不足，另一方面为海绵理念在城市规划设计中的工程实践提供了理论和实验支撑。由模型和算法驱动的 LID 设施空间布局优化能够为海绵城市建设提供丰富的数据资料和方法支撑，可用于指导海绵小区的前期规划设计与中期改造，为解决城市水资源、水生态、水环境问题提供有效方案。同时，该方法为海绵城市中的低影响设施综合效益评价提供了新思路，弥补了现阶段对海绵城市建设效果监测和评估的不足。

3.2 海绵城市理念对城市规划设计的启发

海绵城市的提出，为解决城市水问题提供了新思路和新方法，也促进了城市规划设计的理念革新和实践探索。海绵城市建设是一项复杂的系统性工程，涵盖了城市建设的多个方面，然而从当前国内大部分城市规划工作开展的情况来看，现有城市规划体系对海绵城市建设内容的支撑作用体现不足。本文提出模型和算法驱动的海绵城市 LID 设施空间布局优化方法，并通过实证案例阐述了如何将海绵城市理念科学地纳入城市规划与设计的全过程，能够有效架起城市规划设计与海绵城市建设之间的桥梁。首先，基于数据、模型和算法的 LID 设施空间布局优化方法强化了城市规划与设计中的定量分析环节，通过资料收集与数据融合，以及建模量化分析过程，规划从业者能够更精确地了解 and 掌握城市中的各个要素、功能及其内部的联系。其次，LID 设施的布局与城市详细规划、新区开发、排水系统规划以及景观规划的内容密切相关。例如：在控制性详细规划中，可根据地块的地质地貌条件划分汇水区，进行地块开发强度评估，为低影响开发策略的确定、公共设施和配套市政的设置提供重要参考。最后，SWMM 模型构建过程中，竖向设计是决定汇水区划分、雨水管网和节点布置、LID 设施选择与布局的关键要素。竖向设计的重要性敦促城市规划设计要结合用地性质、地质地貌、竖向条件以及给排水管网来确定用地的容积率、绿地率等指标，并根据雨水控制要求和模型模拟结果实施具体的控制设施，使其满足海绵城市理念的规划预期。

城市规划的目的之一是为了解决各种城市问题，创造更好的人居环境，促进城市良好发展。将海绵城市理念科学地纳入城市规划设计的全过程对我国日益加快的城镇化进程

① 在“本文开放的科学数据与内容”中提供了两个典型方案的示意图和说明（请以手机扫描本文末页的二维码查看）。

来说十分重要,这也敦促我们从规划设计源头入手,协调各级规划,进而有效地缓解城市水问题。因此,应加深对海绵城市相关理论、方法和技术的研究,根据不同城市要素、区域及其土地利用特点,合理规划建设海绵城市,减少因城市内涝、水污染等问题对城市正常运行和健康发展的影响。**UPI**

参考文献

[1] WONG T H F. An overview of water sensitive urban design practices in Australia[J/OL]. Water practice & technology, 2006, 1(1)[2022-08-20]. <https://iwaponline.com/wpt/article-abstract/1/1/wpt2006018/20879/An-Overview-of-Water-Sensitive-Urban-Design?redirectedFrom=fulltext>.

[2] SCHLUTER W A. Performance of three sustainable urban drainage systems in East Scotland[C]. Global Solutions for Urban Drainage, 2002: 1-17.

[3] IGNATIEVA M, MEURK C, STEWART G. Low Impact Urban Design and Development (LIUDD): matching urban design and urban ecology[J]. Landscape review, 2007, 12(2): 61-73.

[4] 程萌. 有关城市建设中海绵城市规划设计的探讨[J]. 智能城市应用, 2019, 2(8): 112-114.

[5] 仝贺, 王建龙, 车伍, 等. 基于海绵城市理念的城市规划方法探讨[J]. 南方建筑, 2015(4): 108-114.

[6] Prince George's County (MD). Low-impact development design strategies: an integrated design approach[R]. Prince George's County, Maryland, 2000[2022-08-20]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=20004JX4.txt>.

[7] JIA H, WANG X, TI C, et al. Field monitoring of a LID-BMP treatment train system in China[J]. Environmental monitoring and assessment, 2015, 187(6): 1-18.

[8] 魏依柯, 陈前虎. 国际视野下的可持续雨洪管理政策研究——基于美国、英国和中国的比较[J/OL]. 国际城市规划. (2020-10-30)[2021-11-30]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAJ&dbname=CAJLAST&filename=GWCG20210916002&uniplatform=NZKPT&v=uB5d7wWOBCcxdn0Rqc_ySe3JzGETZtnck_aRzFkC2S8Lwx3BK2sS91kyoIgf1Ww. DOI: 10.19830/j.upi.2020.384.

[9] 蒙小英. 城市小区中暴雨收集与利用的景观化[J]. 华中建筑, 2006(5): 107-111.

[10] 王沛永, 张新鑫. 美国 High Point 住宅区低影响土地开发 (LID) 技术应用的案例研究 [C] // 中国风景园林学会 2011 年会论文集 (下册), 2011: 500-506.

[11] 柯磊, 翟国方, 施益军, 等. 基于综合效益最大化的绿色雨洪基础设施选址研究——以加拿大魁北克市博波尔区为例[J]. 国际城市规划, 2020, 35(6): 120-127. DOI: 10.19830/j.upi.2018.349.

[12] 李海燕, 车伍, 董蕾. 北京城市住区雨水利用适用技术选择[J]. 建筑科学, 2009, 25(12): 7-11.

[13] 乔梦曦. 区域开发不同尺度雨水系统关系研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.

[14] 贾海峰, 姚海蓉, 唐颖, 等. 城市降雨径流控制 LID BMPs 规划方法及案例[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 260-267.

[15] 唐颖. SUSTAIN 支持下的城市降雨径流最佳管理 BMP 规划研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.

[16] 李旦, 叶长青. 基于耦合 SWMM 模型和 NSGA-II 算法的多目标低影响开发措施优化设计方法及应用[J]. 水电能源科学, 2019, 37(6): 58-61.

[17] 林辰松, 董宇翔, 陈泓宇, 等. 基于 NSGA-II 算法的集雨型绿地低影响开发设施规模优化计算方法及应用——以南阳院士小镇为例[J]. 风景园林, 2020, 27(12): 92-97.

[18] 董新宇, 张静慧, 袁鹏, 等. 基于多目标优化的低影响开发设施布局方法[J]. 环境科学学报, 2021, 41(7): 2933-2941.

[19] 李莹, 莫淑红, 杨元园, 等. 基于 NSGA-II 算法的海绵城市 LID 设施布设比例优化[J]. 给水排水, 2021, 57(S1): 475-481.

[20] OUYANG W, GUO B, HAO F, et al. Modeling urban storm rainfall runoff from diverse underlying surfaces and application for control design in Beijing[J]. Journal of environmental management, 2012, 113: 467-473.

[21] 王浩昌, 杜鹏飞, 赵冬泉, 等. 城市降雨径流模型参数全局灵敏度分析[J]. 中国环境科学, 2008(8): 725-729.

[22] 丛翔宇, 倪广恒, 惠士博, 等. 基于 SWMM 的北京市典型城区暴雨洪水模拟分析[J]. 水利水电技术, 2006(4): 64-67.

[23] 常晓栋, 徐宗学, 赵刚, 等. 基于 SWMM 模型的城市雨洪模拟与 LID 效果评价——以北京市清河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016(11): 84-93.

[24] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II[C] // International conference on parallel problem solving from nature. Springer Berlin Heidelberg, 2000: 849-858.

(本文编辑: 张祎娴)



本文更多增强内容扫码进入