Science Research
2026, Vol. 14, No. 6, pp. 489–502
https://doi.org/10.11648/j.sr.20261406.25

Research Article

# Optimization of Blue-Green Infrastructure at High-Risk Waterlogging Points on Changzhou Island, Guangzhou Based on SWMM Simulation

**Chen Tian[1], Weng Yicheng[2, 3, *], Chen Yingying[2]**

[1]Hainan Haikong Urban Integrated Operations Group Co., Ltd., Haikou, China
[2]School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou, China
[3]Guangzhou Key Laboratory of Landscape Architecture, Guangzhou, China

## Abstract

With accelerated urbanization and frequent extreme rainfall events, high-risk urban flooding nodes have become critical vulnerabilities in urban stormwater management. Existing studies mostly evaluate drainage strategies at watershed or urban district scales, while refined simulation and differentiated BGI optimization for typical high-risk waterlogging nodes remain scarce. This study selects four typical high-risk flooding points on Changzhou Island in Guangzhou, constructs a Storm Water Management Model (SWMM), and analyzes existing inundation characteristics under different rainfall return periods (P=1a, 5a, 10a, 20a, 50a, 100a). Based on node types and retrofit conditions, differentiated blue-green infrastructure (BGI) optimization strategies are designed and evaluated using the LID module in SWMM. The results show that the optimized strategies significantly reduce or eliminate inundation under P=1a and 5a conditions, with recession times shortened to approximately one hour. Under P=50a and 100a conditions, the strategies effectively reduce peak flows and delay peak timing, alleviating instantaneous pressure on drainage networks. The runoff reduction rate improves by 0.41%–0.58% compared to the current scenario, with a total volume reduction of 101,190 $m^3$ achieved by BGI under P=100a. The study demonstrates that differentiated BGI optimization for different types of high-risk nodes can markedly improve drainage capacity under conventional rainfall conditions and deliver peak-shaving and hazard-mitigation effects during extreme rainfall. Meanwhile, composite BGI exerts synergistic effects across the source, conveyance and end stages, substantially enhancing the resilience of drainage systems. These findings offer valuable insights for improving stormwater resilience in island-type urban built-up areas.

## Keywords

SWMM, Blue-green Infrastructure, High-risk Water-logging Nodes, Storm-water Safety, Changzhou Island

*Correspondence: Weng Yicheng (wengych@scut.edu.cn)

**Received:** 21 October 2026; **Accepted:** 12 November 2026; **Published:** 25 November 2026

Copyright: © The Author(s), 2026. Published by Science Publishing Group. This is an **Open Access** article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

# 基于 SWMM 模拟的广州长洲岛高危内涝点蓝绿基础设施优化

陈田 [1]，翁奕城 [2, 3*]，陈盈滢 [2]

[1] 海南海控城市综合运营集团有限公司，海口，中国

[2] 华南理工大学建筑学院，华南理工大学，广州，中国

[3] 广州市景观建筑重点实验室，广州，中国

## 摘要

随着城市化加快和极端暴雨频发，高危内涝节点已成为城市雨洪管理的薄弱环节。已有研究多从流域或城区尺度评估排水策略，针对典型高危内涝节点的精细化模拟与 BGI 差异化优化仍较匮乏。选取广州长洲岛四个典型高危内涝点，构建 SWMM 模型并结合不同降雨重现期（P=1a、5a、10a、20a、50a、100a）分析现状积水特征。结合节点类型与改造条件，设计差异化蓝绿基础设施（BGI）优化方案，然后利用 SWMM 的 LID 模块评估效果。结果表明，优化方案在 P=1a、5a 条件下可显著减少或消除积水，退水时间缩短至约 1 小时；在 P=50a、100a 条件下可削减峰值并延缓峰现，缓解管网瞬时压力。径流削减率较现状提升 0.41%~0.58%，P=100a 时 BGI 消解量达 101,190 $m^3$。研究表明，针对不同类型高危节点采取差异化 BGI 优化可显著提升常规降雨下的排涝能力，并在极端降雨中发挥削峰减灾作用。同时，复合型 BGI 在源头、过程与末端形成协同作用，能显著提升排涝系统韧性，对提升城市洲岛雨洪安全具有重要参考价值。

## 关键词

SWMM 模型，蓝绿基础设施，高危内涝点，雨洪安全，长洲岛

## 1. 引言

近年来，随着城市化进程加快和极端气候事件频发，城市内涝已成为威胁城市安全的重大挑战。快速土地开发与大规模硬质铺装导致暴雨期间地表径流急剧增加，排水系统高负荷运行甚至失效，进而引发交通中断、基础设施损毁及人员财产损失[1]。极端暴雨事件在高密度建成区的影响尤为突出，局部“节点性”积涝往往成为系统脆弱环节[2]。

针对城市雨洪问题，近年来研究思路逐渐形成了从“灰色排水系统”向“绿色调蓄系统”转变的趋势。其中，蓝绿基础设施（Blue-Green Infrastructure, BGI）能够通过渗透、滞蓄、净化与蒸散作用，有效削减地表径流、延缓洪峰并改善生态环境[3]。大量案例研究表明，绿色屋顶、透水铺装、下沉式绿地和雨水花园等低影响开发（Low Impact Development, LID）措施在径流削减和水质改善方面具有显著成效，但其效能受控于场地条件与降雨特征[4]。此外，国际上越来越多研究强调BGI的综合功能：不仅能缓解洪涝，还能提升城市宜居性和生态服务功能[5]；在住宅尺度的多标准分析中，BGI被证明是提升气候韧性的有效解决方案[6]。同时，有学者提出应融合生态与工程目标，从而发挥 BGI 的多重协同效益[7]；也有研究指出综合 BGI部署能够在降低城市灾害风险的同时，增进居民福祉与社会韧性[8]。复合型、差异化的 BGI部署，被认为是提升城市雨洪韧性的关键途径[9]。

在分析方法层面，暴雨管理模型（Storm Water Management Model, SWMM）因其能够综合模拟降雨产流、管网输水和 LID效果，被广泛用于城市雨洪风险评估与优化方案验证[10, 11]。近年来，研究者不断改进SWMM的校准方法，并将其与GIS技术结合，用于子汇水区划分与管网概化[12, 13]。然而，现有研究多聚焦于流域或城区整体排水策略评估，针对典型高危内涝点的精细化模拟与BGI差异化优化研究仍显不足[14]，这限制了对局部排涝能力的深入理解与改造效果的精确评估。

因此，本文以广州长洲岛为例，选取岛上4个典型高危内涝点，构建 SWMM 模型并结合6种不同降雨重现期分析现状积水特征，进而设计差异化BGI优化方案并评估其效果，以期为城市洲岛地区雨洪韧性提升提供参考。

## 2. 研究区域与方法

### 2.1. 研究区域

长洲岛位于广州市黄埔区，属珠江下游，属典型江中岛屿型建成区，总面积约10.9km²。岛内地形起伏明显，南部及沿岸地势低洼，北部和中部为丘陵与台地。岛内分布深井涌、新担涌以及1号涌~4号涌等河涌以及农田湿地、基塘水系及传统村落等多样土地利用类型。受地形差异与土地硬化加剧影响，岛内局部区域在暴雨中易形成径流集中，短时强降雨期间常在低洼、管网能力不足或高密度建成区产生严重积水，成为典型高危内涝点。

本研究选取长洲岛金洲大道沿线4个典型高危内涝点（高危节点1-4号分别对应管段：N186-N173、N165-N173、N84-N63、N29-N65，见图1），这4个高危内涝节点常年内涝，对主干道交通和周边居民生活影响显著。

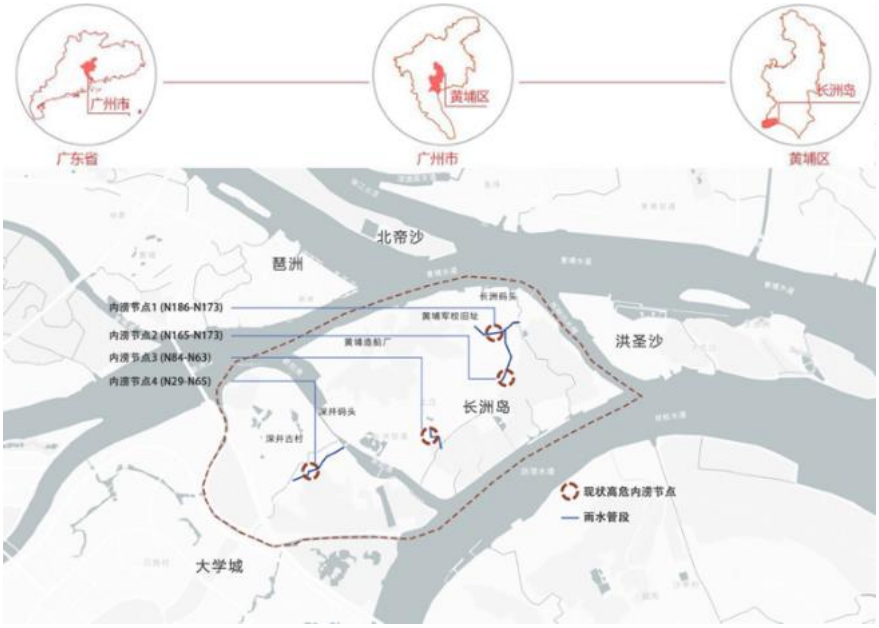



**图 1** 广州长洲岛 4 个高危内涝点分布。

### 2.2. 研究区域

本研究采用SWMM的水文与水力模块进行模拟。通过GIS提取长洲岛高程、坡度和道路结构等数据，综合运用水文分析与人工划分方法，划定32个一级子汇水区并进行二次人工修正，形成更精细的二级子汇水分区；根据现状排水管线布设与节点高程信息，完成管网概化与流向分析。子汇水区和管网的主要参数如表1所示。

**表 1** SWMM 模型重要参数。

| 序号 | 参数类型 | 单位 | 参数值 |
|---|---|---|---|
| 1 | 子汇水区面积 | ha | — |
| 2 | 子汇水区宽度 | m | — |
| 3 | 子汇水区平均坡度 | % | — |
| 4 | 不透水面比率 | % | — |
| 5 | 不透水地表洼蓄深度 | mm | 1 |

| 序号 | 参数类型 | 单位 | 参数值 |
|---|---|---|---|
| 6 | 透水地表洼蓄深度 | mm | 5 |
| 7 | 无洼地不透水面积百分比 | % | — |
| 8 | 管道长度 | m | — |
| 9 | 不透水地表曼宁系数 | — | 0.015 |
| 10 | 透水地表曼宁系数 | — | 0.24 |
| 11 | 管道曼宁系数 | — | 0.013 |
| 12 | 裸土最大入渗速率 | mm/h | 40 |
| 13 | 草丛覆盖最大入渗速率 | mm/h | 70 |
| 14 | 最小入渗速率 | mm/h | 2.2 |

### 2.3. 降雨条件设定

降雨数据参考《广州市中心城区暴雨公式及计算图表》（2011年版）[15]，采用广州市暴雨强度计算公式（式1）生成芝加哥雨型，雨峰系数r=0.4，时间间隔1min，降雨历时120 min，模拟时长24h。设置6种重现期（P=1a、5a、10a、20a、50a、100a），对应累计降雨量依次为67.38、88.01、96.90、105.79、117.53、126.42mm（图2）。

$$q = \frac{3618.427(1+0.4856\lg P)}{(t+11.259)^{0.750}}$$

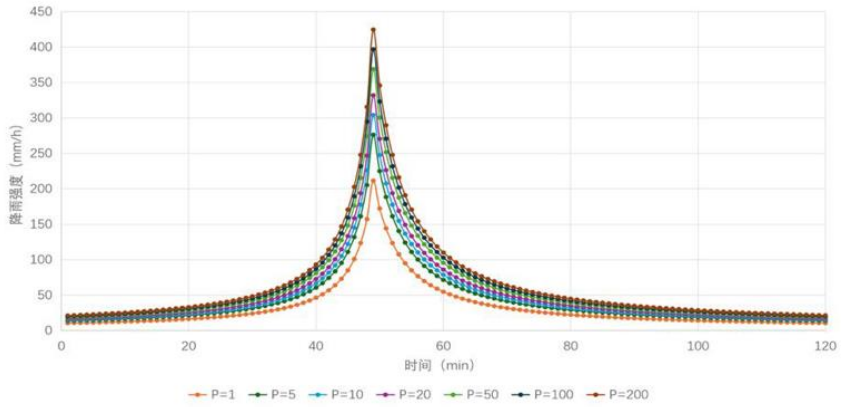



**图 2** 广州市不同重现期下的暴雨设计雨型。

式中，q为设计暴雨强度（L/s/hm²）；P为设计重现期（年）；t为降雨历时（min）。

## 3. 高危节点现状分析

### 3.1. 节点现状特征

基于2024年现场调研，4个高危节点现状特征如表2所示。各节点均位于主干道金州大道沿线，但地形条件、空间形态与改造条件差异显著：节点1处于历史文保区，改造受限；节点2南侧具备一定滞蓄潜力；节点3上游硬质化严重；节点4临近湿地但受地铁施工影响，水系连通受阻。

**表 2** 长洲岛高危内涝点现状情况。

| 节点编号 | 空间特征 | 周边环境与限制 | 蓝绿基础设施条件 | 积水特征 | 现状照片 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 号 | 建筑密集、道路狭窄、无街旁绿化。 | 位于黄埔军校旧址前，属历史文保区，改造受限。 | 无 | 地势低洼，暴雨期积水可达 1m，对排水系统压力大 |  |
| 2 号 | 建筑密集，局部街段有绿化。 | 南侧邻近农田湿地和水塘，具备一定滞蓄潜力；北侧毗邻白鹤岗，高差大。 | 有部分 | 径流汇集点，最大淹没深度可达 1m，已导致居民搬离 |  |
| 3 号 | 建筑较松散，街道宽敞，有人行道及绿化带。 | 上游为硬质化严重的城中村，坡度大，绿化率低。 | 丰富 | 上游径流集中，淹没深度可达 2m，交通干道频繁积水点 |  |
| 4 号 | 地势低洼，道路宽敞，街旁绿化丰富。 | 临近文塔公园下凹湿地与深井涌；受地铁施工影响，与周边水系连通受阻。 | 丰富 | 暴雨期淹没深度约 0.8–1m，导致农作物受淹和经济损失 |  |

## 3.2. 节点分类

结合节点现状特征及改造条件，可将四个高危节点分为三类，如表3：结合节点现状特征及改造条件，将4个高危节点分为三类（表3）：高密度型（节点1），改造受限，宜采用源头分散的小型LID措施；坡度大型（节点2、3），汇流集中，需侧重截流与过程调蓄；低洼型（节点4），蓝绿潜力高，可依托湿地与水系构建分流廊道。

**表 3** 表高危内涝节点特征分类表。

| 节点编号 | 类型 | 改造条件 | 上游汇水特征 | 地势 | 最大积水深度（m） | 周边蓝绿基础设施 | 主要问题 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 高密度型 | 受限 | 中等 | 低洼 | 1.0 | 无 | 硬质化高，空间受限 |
| 2 | 坡度大型 | 一般 | 高 | 中等 | 1.0 | 有部分 | 径流集中，高差大 |
| 3 | 坡度大型 | 良好 | 高 | 低洼 | 2.0 | 丰富 | 上游硬质化严重 |
| 4 | 低洼型 | 优良 | 中等 | 低洼 | 0.8–1.0 | 丰富 | 水系连通性不足 |

基于积水深度、出现时间、退水时间、改造条件及蓝绿基础设施潜力五个维度的雷达图分析（图3）进一步印证了上述分类的合理性：节点1积水出现快、退水慢，改造条件差；节点2指标居中，适合截洪沟与局部绿化组合；节点3积水最深、退水最慢，具备较好改造条件；节点4积水浅且退水快，蓝绿潜力最高。

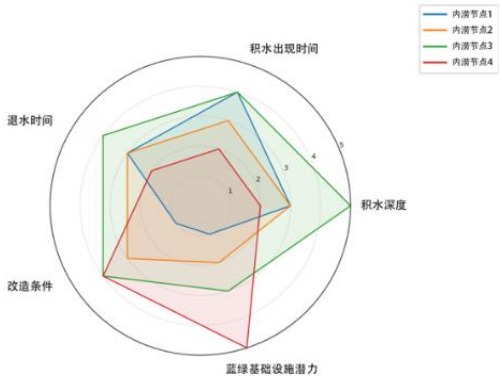



**图 3** 高危内涝节点特征雷达图。

## 4. 情景模拟与结果

### 4.1. 情景模拟

以 SWMM 模型为基础，通过 GIS 与现场调研数据构建长洲岛的产汇流与排水系统，进行情景模拟。

（1）子汇水区划分

综合采用水文分析与人工划分方法。首先利用GIS水文分析模块提取流向、汇水量与河网分级等要素，划定一级子汇水区（共32个），将边界与属性数据导入SWMM（图4、图5）。结合排水管网、山洪沟、道路与农田排水渠分布，对一级分区进行二次人工修正形成二级子汇水区（图6）。各一级子汇水区面积、不透水比例及坡度参数见表4。

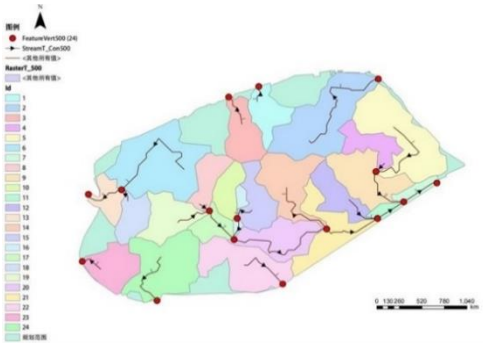


**图 4** 水文分析结果。

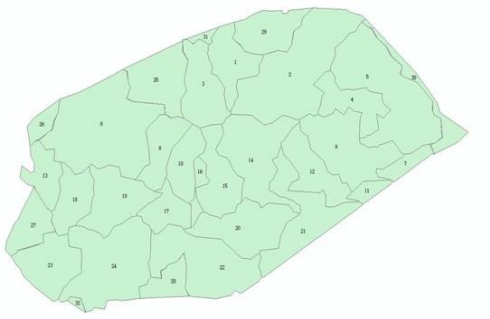


**图 5** 长洲岛 SWMM 模型一级子汇水分区。

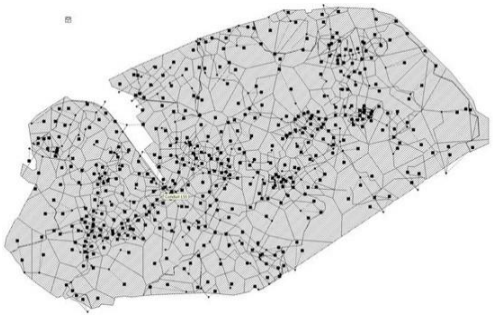


**图 6** 长洲岛 SWMM 模型二级子汇水分区。

**表 4** 一级子汇水区参数。

| 汇水分区名称 | 面积（ha） | 不透水比例（%） | 平均坡度（°） |
|---|---|---|---|
| 1 | 20.26 | 38.86 | 11.91 |
| 2 | 65.58 | 78.63 | 6.47 |
| 3 | 25.36 | 38.80 | 13.27 |
| 4 | 19.12 | 59.91 | 3.26 |
| 5 | 60.50 | 54.16 | 1.06 |
| 6 | 69.83 | 57.60 | 6.83 |
| 7 | 7.19 | 77.80 | 1.54 |
| 8 | 17.70 | 70.23 | 7.19 |
| 9 | 37.85 | 54.05 | 2.76 |
| 10 | 16.03 | 74.53 | 6.27 |
| 11 | 4.93 | 63.99 | 1.35 |
| 12 | 22.14 | 45.91 | 2.92 |
| 13 | 14.32 | 50.00 | 5.27 |
| 14 | 38.70 | 78.25 | 5.63 |
| 15 | 22.63 | 67.67 | 6.13 |
| 16 | 4.95 | 75.13 | 3.63 |
| 17 | 13.73 | 68.49 | 4.95 |

| 汇水分区名称 | 面积（ha） | 不透水比例（%） | 平均坡度（°） |
|---|---|---|---|
| 18 | 17.38 | 54.34 | 5.16 |
| 19 | 27.05 | 80.87 | 3.80 |
| 20 | 32.06 | 58.98 | 2.79 |
| 21 | 34.20 | 52.10 | 1.42 |
| 22 | 43.79 | 47.82 | 3.44 |
| 23 | 25.35 | 42.69 | 2.46 |
| 24 | 51.03 | 45.15 | 5.10 |
| 25 | 26.85 | 70.82 | 4.55 |
| 26 | 6.06 | 44.12 | 14.42 |
| 27 | 14.98 | 36.48 | 3.28 |
| 28 | 10.80 | 43.45 | 8.26 |
| 29 | 20.89 | 58.30 | 7.13 |

（2）管网概化与流向梳理

现状管网结构是 SWMM 模型产流计算和排水过程模拟的核心数据。根据现状排水管线布设与节点高程信息，完成长洲岛管网概化与流向分析，见图7。

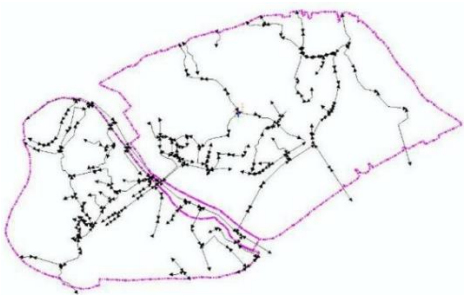


**图 7** 管线概化与流向图。

（3）高危节点 LID 优化配置

对4个高危节点周边区域进行LID设施优化配置（图8、表5）：




**图 8** 高危内涝节点 LID 设施分布。

**表 5** 高危内涝节点类型及 LID 设施配置。

| 节点编号 | SWMM 管段编号 | 节点类型 | LID 设施配置 |
|---|---|---|---|
| 节点 1 | N186-N173 | 高密度型 | 下沉绿地、雨水花园、植草沟、生态调蓄池 |
| 节点 2 | N165-N173 | 坡度大型 | 绿色屋顶、透水铺装、雨水蓄水池 |
| 节点 3 | N84-N63 | 坡度大型 | 绿色屋顶、透水铺装、下沉绿地、雨水花园 |
| 节点 4 | N29-N65 | 低洼型 | 绿色屋顶、透水铺装、雨水蓄水池、山洪截流沟 |

（4）模拟条件

降雨条件设定基于1a、5a、10a、20a、50a、100a六种重现期设计暴雨，降雨历时120 min，总模拟时长24h，时

间步长1 min。模型计算输出包括各节点的积水出现时间、峰值深度、退水时间及管网溢流情况，为后续优化效果对比提供基准。

## 4.2. 不同重现期下的现状积水特征

基于SWMM模型，对6种重现期（P=1a~100a）条件下的现状排水系统进行情景模拟。重点分析积水出现时间、峰值深度及退水时间三项指标。

（1）积水出现时间

P=1a时，各节点在降雨约40 min后出现积水；随重现期增大，积水出现时间逐步提前。P=10a时，高危节点区域在降雨21 min内即出现积水；P=50a、100a时，各节点积水提前至降雨后25~30 min。

（2）峰值积水深度

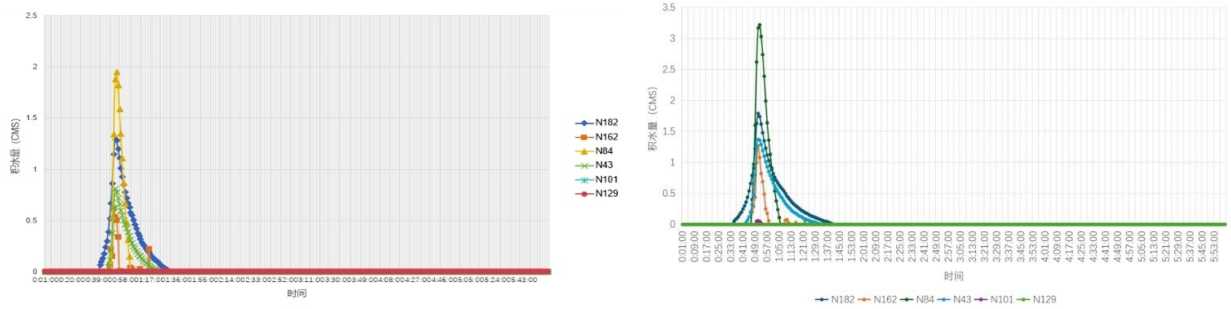
各节点峰值深度差异显著（表6）。节点3风险最高，P=20a时即达1.8 m，P=100a超过2.0m；节点1与节点2峰值相近；节点4峰值最低，P=100a时仍不超过1.0m，说明周边蓝绿基础设施发挥了一定调蓄作用。

**表 6** 不同重现期下四个节点峰值积水深度（m）。

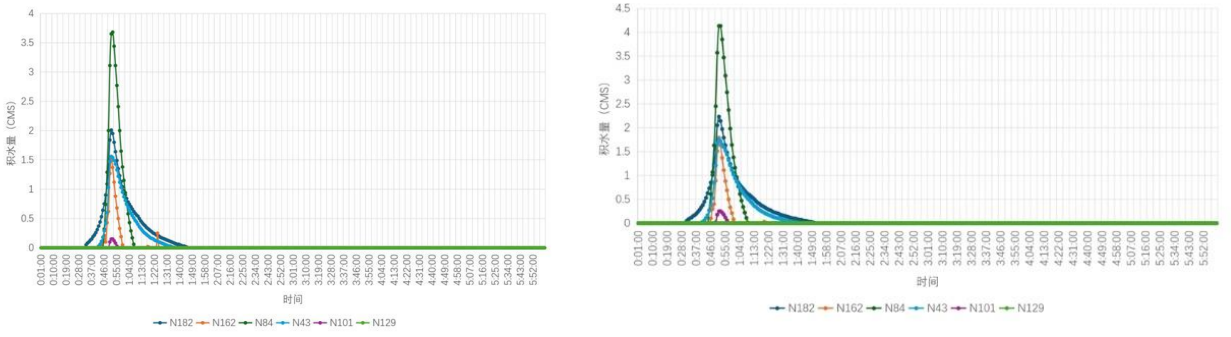
| 节点 | 1a | 5a | 10a | 20a | 50a | 100a |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.65 | 0.85 | 1.00 | 1.05 | 1.20 | 1.25 |
| 2 | 0.60 | 0.80 | 0.95 | 1.00 | 1.15 | 1.20 |
| 3 | 1.20 | 1.50 | 1.65 | 1.80 | 1.95 | 2.05 |
| 4 | 0.40 | 0.60 | 0.75 | 0.85 | 0.95 | 1.00 |

（3）退水时间

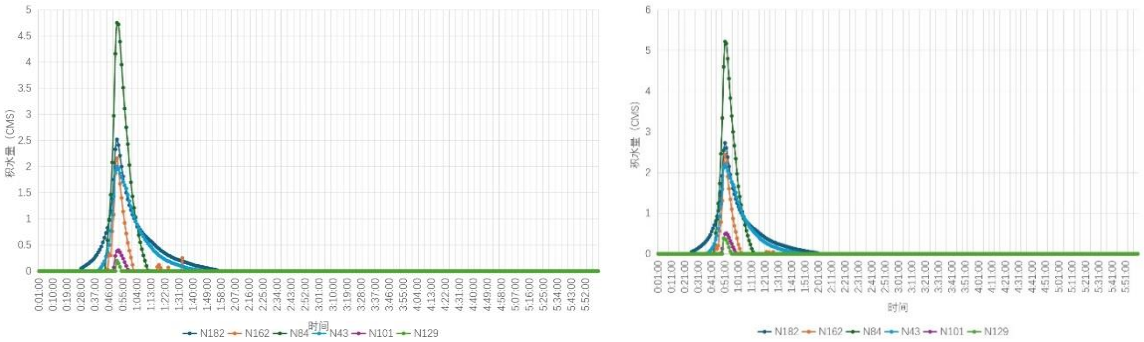
小重现期下，节点4退水最快（<1 h），节点1、2约1.5 h，节点3最慢（约2 h）；随重现期增大退水普遍延长，节点3在P=100a时超过3 h，显示出明显排涝滞后。各节点均在降雨后52~54 min左右开始退水，随重现期增大退水完成时间延迟（图9）。




p=a　　p=5a




p=10a　　p=20a




p=50a p=100a

**图 9** 不同重现期各节点积水量与积水时长。

# 5. 优化方案与效果评估

## 5.1. 差异化 BGI 优化方案

针对4个高危节点的地形特征、积水成因和改造条件，制定差异化BGI优化方案（表7）。优化措施涵盖源头减排（绿色屋顶、透水铺装）、过程调蓄（下沉绿地、雨水花园、植草沟）、末端滞蓄与分流（生态调蓄池、山洪截流沟）等多层次手段，通过SWMM集成的LID模块对各节点子汇水区下垫面进行参数化调整。

**表 7** 高危节点 BGI 优化方案。

| 节点编号 | SWMM 管段编号 | 节点类型 | 主要优化措施 |
|---|---|---|---|
| 1 | N186-N173 | 高密度型 | 绿色屋顶、透水铺装、雨水蓄水池、山洪截流沟 |
| 2 | N165-N173 | 坡度大型 | 绿色屋顶、透水铺装、下沉绿地、雨水花园 |
| 3 | N84-N63 | 坡度大型 | 绿色屋顶、透水铺装、雨水蓄水池 |
| 4 | N29-N65 | 低洼型 | 下沉绿地、雨水花园、植草沟、生态调蓄池 |

## 5.2. LID 参数配置

通过SWMM集成的LID模块对各节点的子汇水区下垫面进行参数化调整。不同类型设施的主要设计参数见表8与表9。

**表 8** 模型设置参数 1。

| 可透水路面 | | 生物滞留层 | | 绿色屋顶结构 | |
|---|---|---|---|---|---|
| 表面洼蓄深度(mm) | 2 | 表面洼蓄深度(mm) | 50~100 | 表面洼蓄深度(mm) | 4 |
| 植被覆盖率 | 0.1~0.4 | 植被覆盖率 | 0.7~0.8 | 植被覆盖率 | 0.7~0.9 |
| 表面糙率 | 0.1~0.25 | 表面糙率 | 0.2~0.4 | 表面糙率 | 0.1~0.25 |
| 铺装厚度(mm) | 100~150 | 种植土壤厚度(mm) | 450~700 | 种植土壤厚度(mm) | 75~150 |

| 可透水路面 | | 生物滞留层 | | 绿色屋顶结构 | |
|---|---|---|---|---|---|
| 铺装层孔隙比 | 0.12~0.21 | 土壤孔隙率 | 0.3 | 土壤孔隙率 | 0.3 |
| 铺装层透水率(mm/h) | 500 | 种植土壤田间持水率 | 0.2 | 种植土壤田间持水率 | 0.2 |
| 蓄水层厚度(mm) | 150~450 | 蓄水层厚度(mm) | 200~400 | 蓄水层厚度(mm) | 70 |
| 蓄水层孔隙比 | 0.4 | 蓄水层孔隙比 | 0.6 | 蓄水层孔隙比 | 0.5 |

**表 9** 模型设置参数 2。

| 下沉绿地 | | 雨水集水池 | |
|---|---|---|---|
| 表面洼蓄深度(mm) | 5 | 最大深度(m) | 3 |
| 植被覆盖率 | 0.7~0.8 | 初始深度(m) | 0.1 |
| 表面糙率 | 0.2~0.4 | - | - |
| 种植土壤厚度(mm) | 450~700 | - | - |
| 土壤孔隙率 | 0.3 | - | - |
| 种植土壤田间持水率 | 0.2 | - | - |

## 5.3. LID 优化前后积水过程对比

在 P=1a条件下，四个节点的积水量变化曲线表明，优化方案虽未完全消除积水，但显著加快了退水速度，见表10。以节点1（N186-N173）为例，未优化情况下降雨停止后约1h才消退，积水持续时间近2h；优化后在 P=20a内几乎无积水，在P=50a时仅出现少量短时积水。

在 P=5a–100a条件下，各节点优化后的积水量均明显削减，峰值延迟5–15min，退水速度提高。节点3（N84-N63）在P=100a时峰值降低0.25 m，退水时间缩短0.5h；节点9（N29-N65）在P=50a仍保持低峰值并快速退水。

**表 10** 各节点现状与优化参数对比。

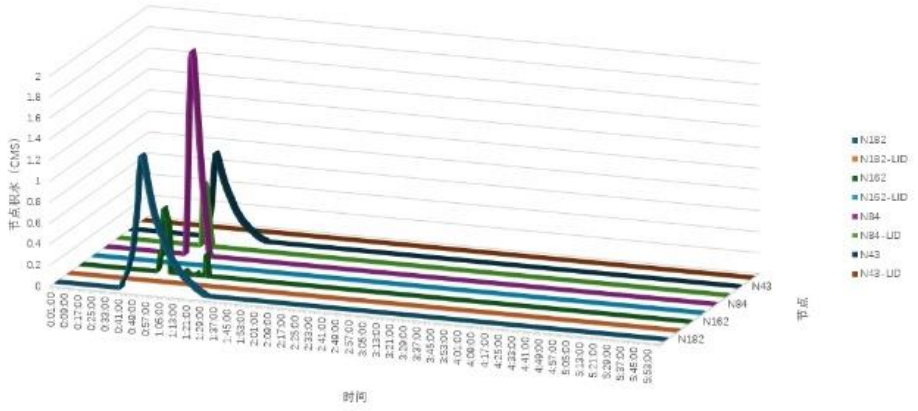
| 节点编号 | 现状不透水百分比 | 优化不透水百分比 | 增加绿化率 | LID 设施占比 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 82 | 74 | 4 | 20 |
| 2 | 74 | 62 | 6 | 40 |
| 3 | 68 | 58 | 5 | 30 |
| 4 | 48 | 38 | 5 | 60 |

图10(a-f)分别展示了P=1a～100a六种重现期条件下，N186-N173、N165-N173、N84-N63、N29-N65四个管段在优化措施实施前后的节点积水量变化曲线。

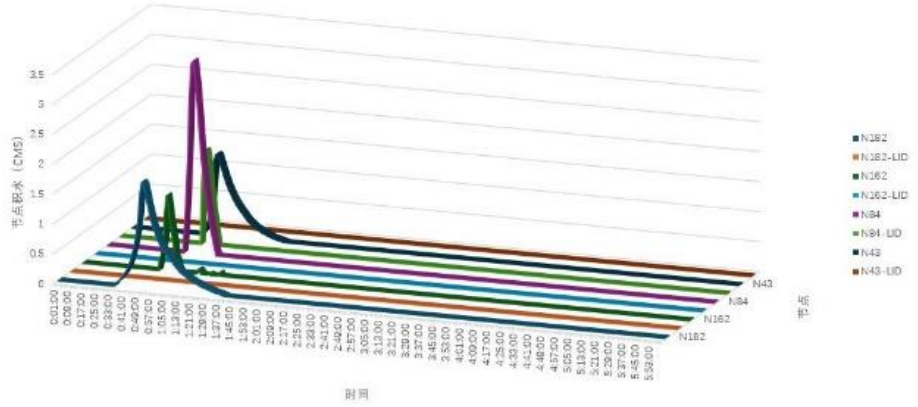
在P=1a条件下，优化措施虽不能完全消除节点积水的产生，但在降雨量较小的情境下可显著加快积水消退速度。以N186-N173节点为例，未施加优化措施时，设计降雨停止后约1 h积水方才消退，模拟过程中积水持续时长约2 h；施加优化措施后，该节点在P=20a以内几乎未产生积水，P=50a时仅出现少量短时积水，排涝效果明显改善。

在P=5a~100a条件下，各节点优化后的积水量均得到大幅削减，同时实现了峰值延缓与积水退散速率的显著提升。随重现期增大，优化措施的削峰效果依然稳定，表明差异化BGI配置在应对较大强度降雨时同样具备有效的调蓄能力。综合来看，针对性的优化策略可有效抑制积水

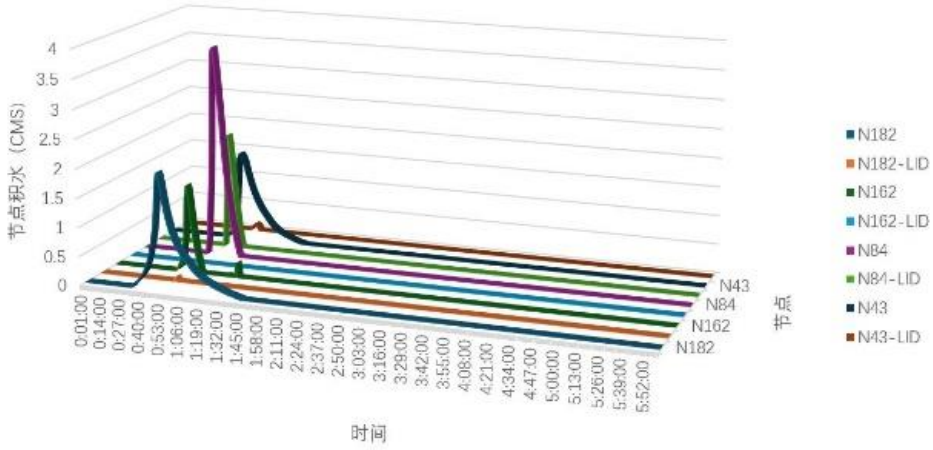
产生、加快积水外排，显著提升场地径流消解效率与整体雨洪安全性。



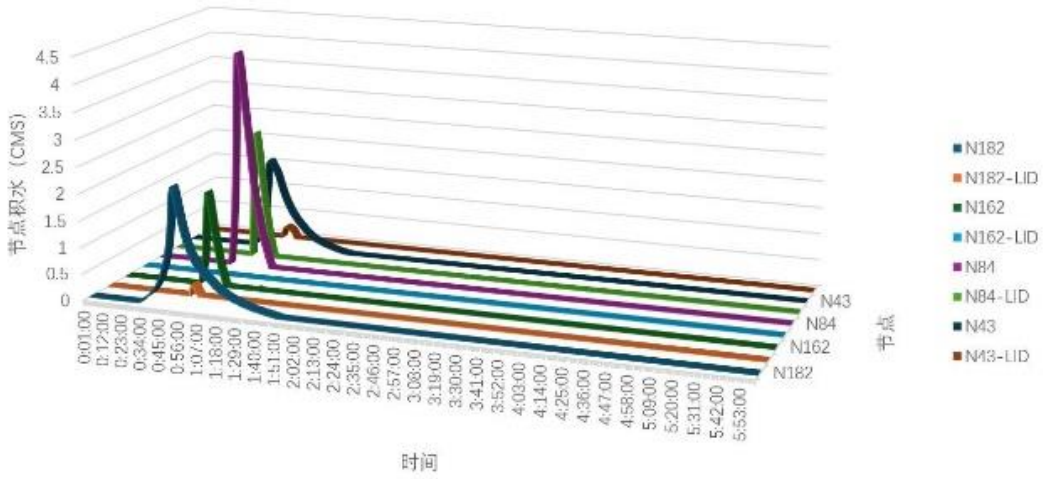

a.一年一遇



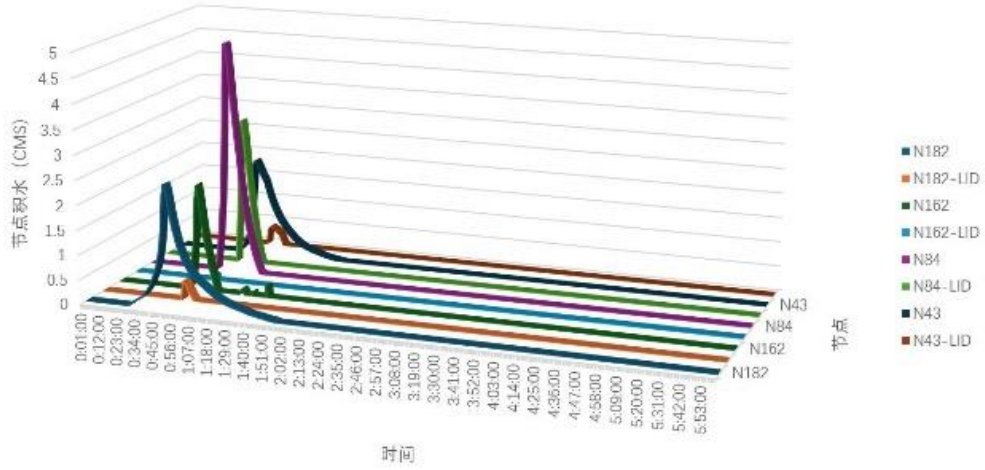

b.五年一遇



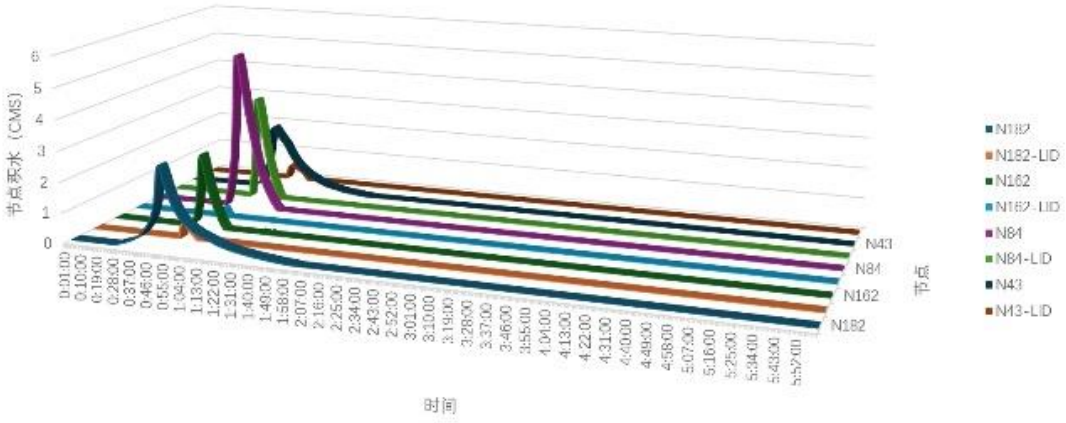

c.十年一遇




d.二十年一遇




e.五十年一遇




f.一百年一遇

**图 10** 不同重现期各节点积水情况。

### 5.4. 径流削减与 BGI 消解量分析

对比现状模型与优化模型的产流统计（表11）可知，优化后的BGI配置显著增强了系统消解能力。现状方案径流消减率在P=1a~100a条件下由18.45%逐步降至10.15%；优化方案对应区间为19.03%~10.56%，较现状提高0.41%~0.58%。P=100a时，优化后BGI总消解量达101,190m³，较现状增加3,980m³，有效缓解了极端降雨下的管网压力。

**表 11** 现状模型与优化模型产流统计表。

| 重现期 | P=1a | P=5a | P=10a | P=20a | P=50a | P=100a |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 对照组径流量(m³) | 507570 | 664950 | 732730 | 800510 | 890120 | 957900 |
| 现状组径流量(m³) | 413920 | 569640 | 636880 | 704190 | 793260 | 860690 |
| 优化组径流量(m³) | 410990 | 566210 | 633290 | 700470 | 789390 | 856710 |
| 现状 BGI 消解量(m³) | 93650 | 95310 | 95850 | 96320 | 96860 | 97210 |
| 优化 BGI 消解量(m³) | 96580 | 98740 | 99440 | 100040 | 100730 | 101190 |
| 现状径流消减率(%) | 18.45 | 14.33 | 13.08 | 12.03 | 10.88 | 10.15 |
| 优化径流消减率(%) | 19.03 | 14.85 | 13.57 | 12.50 | 11.32 | 10.56 |

## 6. 结论

### 6.1. 节点类型与优化措施适配性

研究表明，不同类型高危节点的优化效果差异显著，措施配置需与节点特征相匹配。高密度型节点（如节点 1）受空间限制明显，宜采用绿色屋顶、透水铺装等源头减排与局部调蓄措施，以实现峰值延迟。坡度大型节点（节点2、3）汇流集中，需侧重截流与过程调蓄，下沉绿地与雨水花园组合可显著削峰并加快退水，其中节点3在高重现期条件下削峰幅度最大。低洼型节点（节点4）具备良好生态基础，通过湿地廊道与截流沟的联动可实现低峰值与快速退水，对极端降雨的适应性更强。这表明，基于节点分类的差异化设计较“一刀切”改造更具效能。

### 6.2. 蓝绿基础设施在不同降雨条件下的适用性

模拟结果显示，优化方案在小重现期下（P=1a、5a）可显著消减积水并缩短退水时间；在大重现期（P=50a、100a）下虽难以完全消除积水，但仍能削减峰值与延迟峰现，减轻管网高峰期压力。由此可见，BGI在常规降雨条件下以透水铺装、绿色屋顶等低影响设施为主即可发挥良效，而在极端降雨情境下需结合调蓄池与湿地等末端措施，构建全周期、多层次的综合防涝体系。

### 6.3. 对城市内涝防治的启示

基于SWMM的精细化模拟可准确识别积水机制与失效临界点，为差异化优化提供依据。复合型 BGI 在源头、过程与末端形成协同作用，能显著提升排涝系统韧性。对于岛屿型建成区而言，受空间与地形限制，更需依托现有水系与绿地构建自然—人工结合的排涝网络，以兼顾防涝安全与生态效益。

### 6.4. 研究不足与展望

本研究采用 SWMM 模型对长洲岛典型高危内涝节点进行了差异化优化模拟，验证了蓝绿基础设施在雨洪调控中的有效性，但仍存在一定局限。部分模型参数主要依赖文献和 GIS 数据推算，缺乏长期监测与实测校准，且降雨情境采用单一雨型设定，未能充分反映复杂多变的极端天气条件，在一定程度上可能影响结果的精度与适用性。研究范围仅涵盖岛上 4 个高危节点，虽具有代表性，难以全面揭示全岛排涝系统的整体格局和节点间的系统耦合作用。同时，研究重点集中在径流削减与退水效率方面，未涉及蓝绿基础设施在水质改善、生态服务及长期运维等多维度效益，其实际综合效果也有待后续研究验证与拓展。未来可结合多源监测数据、气候变化情景模拟及多目标综合评价方法，进一步提升模型精度，并推动蓝绿基础设施在多尺度的系统性布局与长效管理。

图表来源：表1参数引自SWMM 用户手册及场地GIS分析；表8和表9参考通用设置数整理。其他图表均为作者自绘。

## 基金项目

2023年度广东省基础与应用基础研究基金项目“基于绿色基础设施雨洪调节服务供需测度的城市洲岛景观格局优化——以广州为例”（编号：2023A1515011482）。

## 参考文献

[1] 张大伟, 王文杰. 极端暴雨条件下城市排涝能力脆弱性研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 112-120.

[2] 黄国如, 李俊, 王凯. 基于城市典型积涝点的排水系统脆弱性分析 [J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 45-50.

[3] 高玉琴, 张曼曼, 李凌浩. 蓝绿基础设施在城市雨洪管理中的应用进展 [J]. 人民长江, 2021, 52(6): 12-18.

[4] 周倩倩, 王慧. 低影响开发措施在城市雨洪控制中的适用性研究 [J]. 中国给水排水, 2019, 35(14): 50-55.

[5] Ariyarathna S I, Abeyrathna P W, Jamei E, et al. A Review of the Application of Blue–Green Infrastructure (BGI) as an Effective Urban Flood Mitigation Strategy for Livable and Healthy Cities in Australia [J]. Architecture, 2023, 3(3): 461-476. https://doi.org/10.3390/architecture3030025

[6] Zabłocka B J, Łukasiewicz E. Blue–Green Infrastructure Effectiveness for Urban Stormwater Management: A Multi-Scale Residential Case Study [J]. Land, 2025, 14(7): 1340-1340. https://doi.org/10.3390/land14071340.

[7] Perrelet K, Moretti M, Dietzel A, et al. Engineering blue-green infrastructure for and with biodiversity in cities [J]. npj Urban Sustainability, 2024, 4(1): 27. https://doi.org/10.1038/s42949-024-00163-y

[8] Jagadisan S. Promoting integrated blue–green infrastructure for urban resilience—lessons learned from case studies [J]. Frontiers in Water, 2024, 61474411-1474411. https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1474411

[9] 闫雪静, 王国辉. 海绵城市建设中低影响开发设施组合优化研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 162-168.

[10] 杨钢, 郭艳红, 张元勋, 等. 基于 SWMM 模型的城市雨水管网排水能力分析 [J]. 给水排水, 2018, 54(10): 124-130.

[11] Chiu Y J, Chang L, Lee J. Hydrologic performance assessment of low impact development facilities based on monitoring data and SWMM modeling in an urban catchment in Taiwan[J]. Scientific Reports, 2025, 15:27251. https://doi.org/10.1038/s41598-025-11586-7

[12] Ahmadi H; Scott D, Sample D. J.; Behrouz S M. Automated Calibration of SWMM for Improved Stormwater Model Development and Application. Hydrology 2025, 12, 129. https://doi.org/10.3390/hydrology12060129

[13] 王军, 赵欣. 基于 GIS 与 SWMM 的城市雨水管网排水能力分析 [J]. 人民黄河, 2017, 39(10): 99-104.

[14] 王小杰, 刘庆生. 基于 SWMM 模型的城市排涝系统失效机理研究 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2): 93-100.

[15] 广州市水务局, 广东省气候中心. 广州市中心城区暴雨公式及计算图表 [R]. 广州: 广州市水务局, 2011. (穗水〔2011〕214 号).