

源头减排措施对于市政雨水排放的削减效果分析

——以北方半干旱城市为例

于凯*, 吕华杰, 李依静, 赵曜, 雷玉璞

中国城市建设研究院有限公司 北京

【摘要】在海绵城市建设中, 源头减排措施可以有效地削减径流量以及径流污染, 对于城市雨水排放起到了错峰缓释的作用。本文以北方半干旱城市为例, 采用经验公式计算并结合 SWMM 模型模拟辅助验证的方式, 研究并计算了源头减排措施对于雨水排放的削减比例。通过计算, 源头减排措施在不同重现期降雨情况下对于雨水排放的削减比例不同。在年径流总量控制率 85% 的改造强度时, 在 1 年一遇、2 年一遇、3 年一遇、5 年一遇、10 年一遇重现期降雨情景下, 雨水流量削减比例分别为 82%~83.8%、63.5%~65.6%、56.2%~58.3%、49.2%~51.1%、41.4%~43.9%。本研究所形成的源头减排对于市政雨水排放的削减比例可为北方半干旱城市雨水排放方案优化提供参考, 在城市规划设计时采用经济、合理、高效的改造措施。

【关键词】海绵城市; 市政给排水; 排水防涝; EPA SWMM 模型

【收稿日期】2023 年 7 月 20 日 **【出刊日期】**2023 年 8 月 25 日 **【DOI】**10.12208/j.jer.20230025

Analysis of the reduction effect of source emission reduction measures on municipal stormwater discharges ——a case study of semi-arid cities in Northern China

Kai Yu*, Huajie Lv, Yijing Li, Yao Zhao, Yupu Lei

China Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing

【Abstract】In sponge city construction, runoff reduction measures can effectively reduce runoff volume and runoff pollution, and play a role of peak mitigation for urban stormwater discharge. In this paper, the reduction ratio of runoff reduction measures to stormwater discharge is calculated using empirical formulae and SWMM model to assist verification in semi-arid cities in the north as an example. The calculation shows that the reduction ratio of source emission reduction measures for stormwater discharge is different under different rainfall scenarios in different recurrence periods. At a volume capture ratio of annual rainfall of 85%, the reduction percentages of stormwater flow under the 1-year, 2-year, 3-year, 5-year, and 10-year return period rainfall scenarios were 82% to 83.8%, 63.5% to 65.6%, 56.2% to 58.3%, 49.2% to 51.1%, and 41.4% to 43.9%, respectively. The reduction ratios of runoff reduction for municipal stormwater discharges developed in this study can provide a reference for the optimization of stormwater discharge schemes in semi-arid cities in the north, and the use of economic, reasonable, and efficient retrofit measures in urban planning and design.

【Keywords】Sponge city; Municipal water supply and drainage; Drainage and waterlogging prevention; EPA SWMM model

引言

“海绵城市”是我国特色的城市建设理念, “海绵城市”是指在城市建设的过程中, 城市能够像海绵一样, 可以在降雨时吸收雨水, 需要用水时再加

以释放, 用于灌溉、道路浇洒等, 使城市具有良好的“弹性”和“韧性”。“海绵城市”作为新一代雨洪管理理念, 可用于系统解决城市水安全、水环境、水生态、水资源的问题。我国自首次提出“海

*通讯作者: 于凯

绵城市”的概念以来, 各界对于“海绵城市”的作用众说纷纭, 部分地区对于“海绵城市”理念以及源头减排措施的作用缺少理解。针对此现象, 同时减少“海绵城市万能论”以及“海绵城市无用论”的宣传引导, 本文展开研究, 量化分析海绵城市建设中的源头减排设施对于北方半干旱城市市政雨水排放的削减效果。

1 概述

源头减排措施对控制雨水外排、降低雨水管网溢流量以及溢流频率起着至关重要的作用。相关削减效果以及削减措施已有部分研究证明, 如黄锦松等^[1]提出, 在固原市 23km²的研究范围内 2 年一遇的情况下, 海绵城市措施可降低积水量的 59.54%、积水面积峰值的 62.5%; 孟雨婷^[2]提出, 在海绵化改造措施比较密集的街区内, 街区内涝面积削减率达到了 48.96%; 李小龙^[3]提出, 在南京某片区 3.94km²的研究范围内 3 年一遇的情况下, 海绵设施建设对于峰值流量削减率为 48.2%。本文以呼和浩特市某一排水分区为例, 计算雨水实际外排量, 通过经验公式计算与模型模拟计算相结合的方式, 核算海绵设施对于雨水外排的影响。

1.1 呼和浩特市设计雨型

常见短历时降雨雨型有芝加哥雨型、三角雨型、Huff 雨型、均匀雨型等, 其中以芝加哥雨型最为常见。通过芝加哥雨型结合暴雨强度公式计算, 可制作降雨文件以进行短历时降雨情景下的模拟。根据呼和浩特市地方标准《暴雨强度公式与设计雨型》(DB1501/T0030-2022)^[4], 呼和浩特市暴雨强度公式为:

$$q = \frac{973.99 \times (1 + 0.906 \lg P)}{(t + 5.622)^{0.721}}$$

可转化为:

$$i = \frac{5.83 \times (1 + 0.906 \lg P)}{(t + 5.622)^{0.721}} \text{ (mm/min)}$$

式中:

| | | |
|---|----|--|
| q | —— | 单位面积上某一历时降水的体积, L/(s·hm ²) |
| i | —— | 暴雨强度, mm/min |
| P | —— | 重现期, 年 |
| t | —— | 设计降雨历时, 分钟 |

降雨厚度计算公式及推导过程^[5]如下:

历时 t_d 降雨总量:

$$H = i \times t_d = \frac{a \times t_d}{(t_d + 5.622)^{0.721}} \text{ (mm/min)}$$

t 时刻瞬时降雨强度

$$i = \frac{dH}{dt} = \frac{a \times [(1-n) \times t + b]}{(t+b)^{n+1}} \text{ (mm/min)}$$

$$t = t_b + t_a = t \times r + t \times (1-r) \rightarrow t = \frac{t_b}{r} = \frac{t_a}{(1-r)}$$

峰前:

$$i_b = \frac{a \times \left[\frac{(1-n) \times t_b}{1-r} + b \right]}{\left(\frac{t_b}{1-r} + b \right)^{n+1}}$$

峰后:

$$i_a = \frac{a \times \left[\frac{(1-n) \times t_a}{r} + b \right]}{\left(\frac{t_a}{r} + b \right)^{n+1}}$$

将呼和浩特市暴雨强度公式导入芝加哥雨型后, 生成呼和浩特市不同降雨重现期下降雨曲线。根据呼和浩特市暴雨强度公式, 计算不同降雨重现期 2 小时设计降雨雨型每分钟降雨量累积值, 最后得出呼和浩特市不同重现期下 2 小时降雨量如表 1。

1.2 呼和浩特市年径流总量控制率对应降雨量

选取呼和浩特市近 30 年逐日降雨量资料, 将日降雨量从小到大进行排序, 整理设计降雨量与年径流总量控制率之间的关系。结合呼和浩特市年径流总量控制率与设计设计降雨量对应关系, 汇总得出呼和浩特市不同年径流总量控制率下的设计降雨量如表 2。

2 研究范围及计算过程

2.1 研究范围概述

本文针对呼和浩特市某一海绵城市示范片区展开研究, 总面积约 8.9km², 该示范片区用地以住宅用地、商业用地为主, 片区雨水通过地面汇入雨水管网后排入东侧河道。未来将通过“破硬增透”、“绿地下沉”等方式打造海绵城市建设示范片区。本文基于呼和浩特市 0.6m 分辨率卫星影像图, 采用 ArcGIS 工具对卫星影像图进行裁剪得到片区影像图, 最后利用 ArcGIS “影像分类”工具采用“极大似然法”对影像图进行计算解析。片区影像图及下垫面解析结果如图 1。根据片区下垫面解析结果计算, 片区现状综合径流系数为 0.61, 片区下垫面统计如表 3。

表 1 呼和浩特市不同重现期 2 小时降雨量

| 重现期 | 1 年一遇 | 2 年一遇 | 3 年一遇 | 5 年一遇 | 10 年一遇 |
|----------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 降雨量 (mm) | 21.67 | 27.59 | 31.05 | 35.41 | 41.32 |

表 2 呼和浩特市年径流总量控制率对应设计降雨量

| 年径流总量控制率 | 70% | 75% | 80% | 85% | 90% | 95% |
|------------|------|-----|------|------|------|------|
| 设计降雨量 (mm) | 12.1 | 16 | 18.1 | 22.5 | 28.5 | 36.1 |

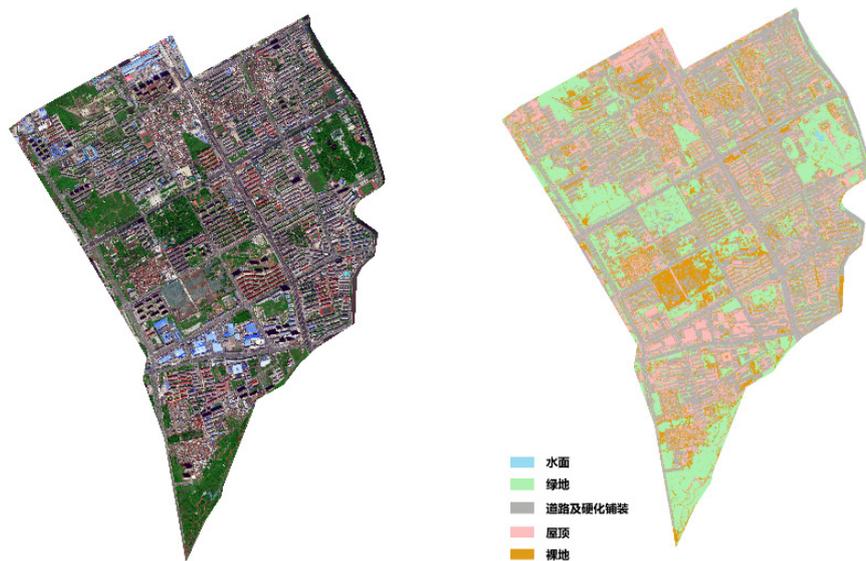


图 1 片区影像图 (图左) 及下垫面解析图 (图右)

表 3 片区下垫面统计表

| 下垫面类型 | 面积 (ha) | 占比 | 径流系数 |
|-------|---------|---------|------|
| 屋面 | 212.87 | 28.36% | 0.90 |
| 道路及铺装 | 292.72 | 32.81 % | 0.85 |
| 绿地 | 254.53 | 28.53% | 0.20 |
| 裸地 | 254.53 | 28.53 % | 0.20 |
| 水面 | 0.35 | 14.76 % | 0.40 |
| 合计 | 892.18 | 100.00% | 0.61 |

表 4 呼和浩特市源头减排措施对于雨水控制比例

| 重现期 | 降雨量(mm) | 年径流总量控制率 | 年降雨径流总量控制率对应设计降雨量 (mm) | 控制比例 |
|--------|---------|----------|------------------------|-------|
| 1 年一遇 | 21.67 | 75% | 16 | 73.8% |
| | | 85% | 18.1 | 83.5% |
| 2 年一遇 | 27.59 | 75% | 16 | 58.0% |
| | | 85% | 18.1 | 65.6% |
| 3 年一遇 | 31.05 | 75% | 16 | 51.5% |
| | | 85% | 18.1 | 58.3% |
| 5 年一遇 | 35.41 | 75% | 16 | 45.2% |
| | | 85% | 18.1 | 51.1% |
| 10 年一遇 | 41.32 | 75% | 16 | 38.7% |
| | | 85% | 18.1 | 43.8% |

2.2 计算过程

本研究针对未建源头减排设施、按年径流总量控制率 75%改造、按年径流总量控制率 85%改造三种情况计算。采用经验公式计算与模型模拟计算相结合的方式对比分析。

(1) 经验公式计算法

由表 1 可知, 呼和浩特市整体降雨量偏低, 1 年一遇 2 小时对应降雨量为 21.67mm, 10 年一遇 2 小时对应降雨量为 41.32mm。结合表 2, 计算出不同年径流总量控制率下, 源头减排措施对于雨水排放的控制比例如表 4。

(2) 模型模拟计算法

关于市政雨水排放模拟, 常用软件有 EPA SWMM 模型、MIKE 系列模型、SUSTAIN 模型、Infoworks 系列模型、STORM 模型等。其中, 相比于其他模型, EPA SWMM 模型问世最早, 水力学、水文学模型计算说明最详细, 且国内外大多数雨洪模型计算内核都以 EPA SWMM 计算内核为基础, 在其基础上进行开发。本次模型模拟计算采用 EPA SWMM5.2 计算。EPA SWMM 系列模型是美国联邦环保署 (U.S. Environmental Protection Agency, 简称 EPA) 研发的雨洪模拟软件, 全名为 Storm Water Management Model, 是最早应用于城镇排水领域的模型软件之一。EPA SWMM 模型耦合了水力学、水文学模块, 可以较为准确地模拟降雨、汇流、管网传输等雨水动态变化过程。EPA SWMM 在 5.0 版本

之后增加了对 LID/BMPs 技术的支持, 包涵了生物滞留设施、透水铺装、雨水桶、植草沟、渗渠等 LID 设施。模型可以将 LID/BMPs 单独划分成子汇水区, 适用于小面积的 LID 模拟和较大区域的 LID 技术集成及雨洪控制效果模拟。SWMM 不但可以评估单个海绵体设施的效果, 而且能够模拟片区尺度下低影响开发设施对海绵城市径流量、径流峰值及水质的影响。在低影响开发模拟领域, SWMM 模型计算较为精确地模拟采取低影响开发措施后的流量变化情况。本次针对片区的雨水排放口在不同重现期降雨模拟下的流量变化展开对比。经模型模拟计算, 在现状不改造条件下, 雨水排放口在不同重现期下 2 小时模拟流量变化曲线如图 2。

3 结果分析

3.1 模拟采取源头减排措施前后对比

模型在现状基础上, 通过添加源头减排措施后模拟年径流总量控制率 75%以及 85%两种工况进行对比。模型模拟片区年径流总量控制率 75%作为方案 1, 片区年径流总量控制率 85%作为方案 2。经模型模拟, 按方案 1 行海绵化改造后, 片区综合径流系数由 0.61 降至 0.55; 按方案 2 实施海绵化改造后, 片区综合径流系数由现状 0.61 降至 0.53。模拟两种方案改造前后积水量及削减比例如表 5。

3.2 模拟结果与经验公式计算结果对比

经模拟不同重现期下源头减排措施对于降雨量的削减比例, 与经验公式计算结果对比如表 6。

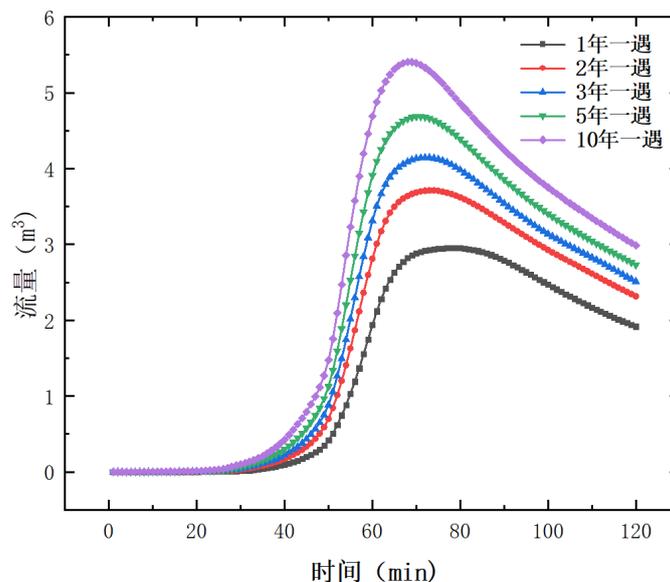


图 2 片区雨水排放口在不同重现期下流量变化

表 5 改造前后积水量削减比例对比

| 重现期 | 改造前积水总量 | 方案 1 积水总量 (m ³) | 削减比例 | 方案 2 积水总量 (m ³) | 削减比例 |
|-----|---------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|
| 1 | 12666 | 3479 | 72.5% | 2281 | 82.0% |
| 2 | 260779 | 11264 | 56.8% | 9519 | 63.5% |
| 3 | 35259 | 17511 | 50.3% | 15441 | 56.2% |
| 5 | 47904 | 26981 | 43.7% | 24318 | 49.2% |
| 10 | 66315 | 41751 | 37.0% | 38871 | 41.4% |

表 6 模拟结果与计算结果对比

| | 年径流总量控制率 75% | | | 年径流总量控制率 85% | | |
|----|--------------|--------|------|--------------|--------|------|
| | 计算结果 | 模拟结果 | 误差 | 计算结果 | 模拟结果 | 误差 |
| 1 | 73.8% | 72.50% | 1.8% | 83.8% | 82.00% | 2.2% |
| 2 | 58.0% | 56.80% | 2.1% | 65.6% | 63.50% | 3.2% |
| 3 | 51.5% | 50.30% | 2.4% | 58.3% | 56.20% | 3.6% |
| 5 | 45.2% | 43.70% | 3.3% | 51.1% | 49.20% | 3.8% |
| 10 | 38.7% | 37.00% | 4.4% | 43.9% | 41.40% | 5.6% |

4 结论

本文采用经验公式计算以及模型模拟计算两种方式对比源头减排措施在北方半干旱城市对于市政雨水排放的削减效果, 初步得出以下结论:

(1) 在北方半干旱城市, 源头减排措施对于雨水排放的削减比较明显, 尤其是在低重现期时, 削减比例可达到 82%, 削减比例随着重现期的提升而递减。

(2) 采用 SWMM 模型模拟时, 模型模拟削减效果结果相比于经验公式计算方法偏低, 但总体误差低于 10%, 计算误差随着重现期提升而增加。

(3) 不同年径流总量控制率对于雨水排放的削减效果不同, 随着重现期的提升而差距减小。以呼和浩特市为例, 1 年一遇情况下, 85%年径流总量控制率要比 75%年径流总量控制率削减效果提高 10%, 而 10 年一遇约为 4%。在进行规划设计时, 应综合考虑地块用地情况以及雨水管网建设情况而综合确定年径流总量控制率。

参考文献

- [1] 黄绵松, 杨少雄, 齐文超等. 固原海绵城市内涝削减效果数值模拟[J]. 水资源保护, 2019, 35(05): 13-18+39.
- [2] 孟雨婷. 海绵城市建设措施的内涝削减效果研究[D]. 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [3] 李小龙. 基于海绵理念的区域水量水质控制数值模拟研究[D]. 东南大学, 2021.
- [4] 《暴雨强度公式与设计雨型》0030-2022[S]. 呼和浩特: 呼和浩特市场监督管理局, 2022.
- [5] 周玉文, 赵洪宾《排水管网理论与计算》(M). 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 115-116.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

