

低影响开发技术在城市雨洪管理中的应用研究

张 慧¹, 陈步岳², 陈 双³

- (1. 山东浩景建设有限公司, 山东 东营 257000;
2. 东营市昌润建设工程有限责任公司, 山东 东营 257000;
3. 东营市东凯建设工程有限公司, 山东 东营 257000)

摘 要 传统排水系统已难以应对频发的城市内涝问题, 针对某城市中心区域, 通过构建暴雨洪水管理模型(SWMM), 模拟分析不同重现期(1a 及 5a, 10a 与 30a, 50a)降雨条件下的内涝特征。研究选取绿色屋顶, 透水铺装与雨水花园三种低影响开发(LID)措施进行组合设计, 采用不同布设比例(20%、50%、100%)方案, 系统评估其对地表径流与管网负荷及节点溢流的控制效果。研究结果表明: LID 组合措施对雨洪有显著的削减作用, 当布设比例为 50% 时达到最优效果, 地表径流削减率可达 44% ~ 46%。

关键词 低影响开发; 雨洪管理; 暴雨洪水管理模型; 地表径流; 节点溢流

中图分类号: TU992

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.029

0 引言

随着城市化进程的加快, 城市不透水表面不断增加, 原有的自然下垫面被破坏, 导致城市雨洪问题日益突出, 传统的“快排”排水体系已难以应对日益频发的城市内涝灾害。低影响开发(LID)技术通过模拟自然水文过程, 采用源头分散式控制措施, 可有效削减地表径流, 已成为解决城市内涝的重要手段。LID 设施包括绿色屋顶、透水铺装、雨水花园等, 通过对降雨的渗、滞、蓄、净、用、排等过程进行控制, 维持土地开发前后水文特征基本不变^[1]。开展 LID 技术在城市雨洪管理中的综合应用研究, 对于提升城市排水防涝能力、推进海绵城市建设具有重要的理论和实践意义。

1 工程概况

1.1 研究区域概况

研究区域位于某市中心城区, 总面积 4.53 平方公里, 属于亚热带季风气候, 年均降水量 1187 毫米。区域内地势较为平坦, 地面海拔均在 8 米以下, 主要包括建筑区与道路、绿地等用地类型。近年来, 随着城市化进程加快, 区域内不透水面积不断增加, 在暴雨情况下易发生内涝, 区域内排水体制为雨污分流制, 现状排水管网总长度约 47.2 公里, 管径范围为 300 ~ 2 000 毫米。根据历史资料统计, 该区域内涝点主要分布在地势低洼处及排水管网老旧区域, 尤其在夏季暴

雨期间内涝问题突出。此外, 研究区域内的排水设施建设年代不一, 部分管网设施服役年限已超过 30 年, 管道淤积与破损等问题日益突出, 同时区域内分布有多个下沉式广场及地下商业空间, 这些区域在暴雨期间极易形成积水, 给居民生活及商业活动带来严重影响, 因此需采用创新的雨洪管理方案来提升区域防涝能力。

1.2 数据来源与预处理

数据主要包括 DEM 数据与土地利用数据、排水管网数据及降雨数据。DEM 数据来源于 ALOS PALSAR 数据, 空间分辨率为 12.5 米, 部分区域经过人工调整以适应实际地形。土地利用数据采用 0.5 米分辨率的遥感影像解译获取。排水管网数据由城市管理部门提供, 包含管道坡度与上下游底高程、管径及节点信息等。降雨数据采用国家气象科学数据中心的实测数据^[2]。数据预处理过程中采用 GIS 技术对用地信息进行分类统计, 结合实地调查对管网数据进行校核, 确保数据的准确性及可靠性, 对原始管网数据进行拓扑检查及概化处理, 保留主干管网共 565 条管线及 584 个节点, 确保管网连通性及合理性。为确保数据质量, 本研究进一步采用高程点实测数据对 DEM 数据进行了精度验证及局部校正, 重点针对建筑密集区及地形复杂区域进行优化; 同时结合无人机航拍影像对土地利用现状进行更新, 重点对新建区域及改造地块的用地性质进行核实, 提高了基础数据的时效性及可靠性。

1.3 研究方法

采用暴雨洪水管理模型 (SWMM) 进行雨洪模拟, 利用泰森多边形法划分 497 个子汇水区, 地表产流采用 Horton 下渗模型, 管网汇流采用动力波法, 模型中确定性参数如汇水区面积与坡度等通过 GIS 计算获得, 不确定性参数, 如下渗参数与曼宁粗糙系数等参考 SWMM 模型手册确定。在参数确定过程中, 充分考虑区域下垫面特征及土壤条件, 对关键参数进行敏感性分析, 确保模型能够准确反映研究区的水文特征。通过芝加哥雨型法对不同重现期降雨进行时程分配, 计算重现期为 1a 及 5a, 10a 和 30a、50a 的设计降雨过程, 模拟总时长 120 分钟, 时间步长 1 分钟。对于不同用地类型, 分别采用实地渗水试验获取土壤下渗特征参数, 并考虑土壤含水量的季节性变化对下渗能力的影响。在管网汇流模拟中, 充分考虑了管道堵塞与破损等因素对水力特性的影响, 通过实测数据对关键节点的水力参数进行了校准及验证。

2 低影响开发技术的应用

2.1 雨洪管理模型构建

SWMM 模型中地表汇流过程将子汇水区概化为透水区及不透水区两部分, 采用固定径流系数法计算径流量, 结合研究区实际情况, 建筑物屋面取值 0.95, 混凝土及沥青路面取值 0.90, 公园绿地取值 0.15, Horton 模型用于计算透水地面下渗量, 管网汇流采用动力波法模拟排水过程; 为提高模型精度, 对管网系统进行概化, 删除支线及细小管道, 保留主干道路上的排水管线, 经拓扑检查确保上下游连接合理, 概化后的排水系统包含 565 条管线与 584 个节点, 管径分布在 300~2 000 毫米之间^[3]。为提高模型精度, 本研究对子汇水区的划分进行了优化, 综合考虑地形特征、用地性质及排水分区等因素, 采用不规则多边形法进行划分, 确保每个子汇水区具有相对独立的汇流特征。同时, 通过实地调查获取管网实测数据, 对原有管网资料进行校核及更新, 建立了较为完整的排水管网数据库。

2.2 LID 措施选择与布设

根据区域用地特点, 选择绿色屋顶与透水铺装, 雨水花园三种 LID 措施进行组合设计^[4]。绿色屋顶主要布设在建筑物屋顶, 由 60 毫米蓄水深度的表面层, 120 毫米厚度的土壤层及 200 毫米厚度的排水层构成; 透水铺装设置在道路及广场, 包括 20 毫米蓄水深度的表面层, 150 毫米厚度的路面层及 400 毫米厚度的蓄水层; 雨水花园布设在公共绿地, 由 200 毫米蓄水深度的表面层, 750 毫米厚度的土壤层及 200 毫米厚度的蓄

水层组成, 所有 LID 设施的下垫面坡度设为 1%, 植被覆盖率为 0.10, 表面粗糙系数取 0.10。在 LID 设施的具体布设过程中, 充分考虑了区域用地条件及景观效果的协调性, 绿色屋顶选用耐旱与抗风的本地植物品种, 透水铺装采用符合城市道路承载要求的高性能透水材料, 雨水花园则融入了景观设计元素, 既确保了雨洪控制效果, 又提升了区域环境品质。

2.3 情景方案设计

基于《暴雨强度计算标准》, 采用芝加哥雨型请求 1a、5a、10a、30a、50a 五种重现期的设计降雨过程, 降雨历时 120 分钟; 降雨强度采用如下公式计算:

$$q=1686.867 \times (1+1.0571gP)/(t+11.300)^{0.628}$$

式中: q 为暴雨强度 (单位: $L/(s \cdot hm^2)$); t 为降雨历时 (单位: min); P 为设计重现期 (a), 针对每种重现期降雨, 设计 20%、50%、100% 三种 LID 布设比例情景, 组合布设比例指每种 LID 措施占其可布设区域最大面积的比例, 雨水花园取公共绿地面积的 30% 作为最大布设面积, 绿色屋顶及透水铺装, 分别在建筑屋面及道路铺装区域内实施。为提高设计降雨的代表性, 本研究收集了近 10 年的暴雨实测资料, 通过统计分析确定降雨峰值系数及时间分配特征, 同时考虑气候变化对极端降雨的影响, 对暴雨强度公式的参数进行了适当调整, 使设计降雨过程更符合当地降雨特征, 提高了情景模拟的可靠性。

3 应用效果评估与分析

3.1 地表径流削减效果

不同重现期下地表径流模拟结果显示, LID 组合措施具有显著的径流削减效果, 如表 1 所示, 在 1a 一遇条件下, 20%、50%、100% 布设比例的径流削减率分别达到 30.66%、66.15%、94.86%; 5a 一遇时, 径流削减率分别为 23.89%、54.51%、89.24%; 随着重现期增加, LID 措施对径流的控制效果逐渐减弱, 在 30a 及 50a 一遇时, 50% 布设比例下的径流削减率分别为 45.92% 及 44.09%。分析表明, LID 措施对于较小重现期降雨的调蓄效果更为明显, 当降雨强度增大时, 调蓄及渗透作用趋于饱和, 削减效果减弱^[5]。

3.2 管网负荷改善效果

排水管网负荷分析显示, LID 措施能够有效降低管网超载程度, 如表 2 所示, 1a 一遇时, 超载管段主要分布在文苑路西端、水月亭西路西段及隆兴港; 随着降雨重现期增加, 超载范围逐渐扩大, 5a 一遇时新增文宗路南端与海昌路北段超载点, 实施 LID 措施后,

管网运行状况得到显著改善,50% 布设比例方案下,各重现期的超载管段比例平均降低 45%,管网运行更加稳定;现场调查发现,这些超载区域多位于地势低洼处,且排水管网年代较早,管径偏小,在强降雨条件下易发生超载^[6]。

表 1 不同重现期下 LID 布设情景的地表径流量 (mm)

布设比例	1a 一遇	5a 一遇	10a 一遇	30a 一遇	50a 一遇
0%	35.42	67.30	81.41	103.40	113.62
20%	24.56	51.22	63.24	82.66	91.81
50%	11.99	30.61	40.10	55.92	63.53
100%	1.82	7.24	13.39	24.46	29.99

表 2 不同重现期下管网超载时长分析

重现期	超载管段比例 (%)	主要超载位置
1a 一遇	9.38	文苑路西端、水月亭西路西段、隆兴港
5a 一遇	15.39	文宗路南端、海昌路北段
10a 一遇	16.63	西山路、联合路
30a 一遇	19.46	管网负荷进一步加重
50a 一遇	20.70	超载范围无明显扩大

3.3 节点溢流控制效果

节点溢流模拟结果表明,随着重现期增加,溢流节点数量及溢流量逐渐增大^[7]。如表 3 所示,在 5a 一遇降雨条件下,研究区域出现 7 处溢流点;10a、30a 及 50a 一遇时分别增至 12、27 及 35 处,LID 措施的实施对节点溢流具有显著的控制效果。20%、50%、100% 布设比例下,各重现期溢流量平均削减率分别为 20.12%、42.47%、64.07%;对比不同布设比例发现,当布设比例从 20% 提高到 50% 时,溢流削减效果提升明显;而从 50% 增至 100% 时,边际效益递减,考虑经济性 & 实施效果,建议采用 50% 的布设比例方案。模拟结果还显示,LID 措施的溢流控制效果与设施布局密切相关,建议在溢流风险较高的区域加大 LID 设施密度^[8]。

表 3 不同重现期下节点溢流量对比 (m³)

布设比例	1a 一遇	5a 一遇	10a 一遇	30a 一遇	50a 一遇
0	531.50	1 557.27	2 029.93	2 802.50	3 165.59
20%	372.74	1 236.22	1 654.51	2 347.65	2 676.99
50%	234.66	861.39	1 207.07	1 795.40	2 078.83
100%	156.66	484.78	710.66	1 157.57	1 383.79

4 结束语

通过模型模拟与情景分析表明,LID 组合措施能够有效控制城市雨洪。研究发现,随着布设比例增加,对地表径流及节点溢流的削减效果逐渐增强,但在极端降雨条件下效果趋于饱和,当布设比例为 50% 时可实现较优的雨洪控制效果。研究结果可为 LID 技术在城市雨洪管理中的应用提供参考。未来,可进一步关注 LID 措施的成本效益分析、管网数据精度优化以及河道水位变化影响,同时应加强不同气候条件下 LID 措施的长期运行效果评估与维护管理研究,为城市雨洪管理决策提供更全面的科学依据。

参考文献:

- [1] 周力行.宿迁地区乡村景观环境低影响开发(LID)技术在雨洪管理中的应用[J].农业工程技术,2024,44(09):11-16.
- [2] 黄若琳,王钊洋,潘晓骏,等.低影响开发设施组合下的城市雨洪调控情景模拟研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(04):22-35.
- [3] 罗为维,周旭,刘晓林,等.基于雨洪风险模拟的城市低影响开发适建性分析[J].西华师范大学学报(自然科学版),2024,45(02):172-180.
- [4] 赵军,王雷,李春晓,等.城市雨洪 SWMM 构建与灰绿组合设施综合效能评价研究[J].科技风,2025(10):7-9.
- [5] 赵长森,李毛毛,段震,等.缺管网资料地区城市源汇雨洪模型构建及应用[J/OL].南水北调与水利科技(中英文),1-22[2025-04-16].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=PCBa4GjaZh_yDIYPzhDrPFsXXSOCrGOxm tmyZ9SRLc-nP-RvWHIRPla7U5JuXLGfPLE6a3xsaLjDGzUY5Hfux2cL-2SLK5_8WJ0jBqTG08WnLGtqnsTcFXabogAVwf9ndP1cMHLMR_pP1VtjP24uioqq079cslyrAzHuutdIJ0tiOEm7Nj2fQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [6] 陈潇潇.基于生物滞留措施的城市雨洪径流污染净化试验分析[J].水利技术监督,2025(03):171-175.
- [7] 王润梓.基于绿色基础设施视角下城市雨洪管理策略研究[J].新型城镇化,2025(02):50-53.
- [8] 刘正疆,张浩,马丽娜,等.城市地表雨洪特征的数值模拟研究(英文)[J/OL].水利水电技术(中英文),1-21[2025-02-14].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=PCBa4GjaZh9xtgFRYcal3s-BEeqdf_3nKw2Qj8oGxqPv4VZCLASih-MKAbguJ7RhHxsn8mYCPPts4ExL_pSj9ZteyfbnDuqHzXrvNWYtB06TfId3w1c7_JoqM_mHwwGBCzoP8ACykyUcGX4PhAwC_cBOUPTni8zziNOPs5U5ERMZogIFPArV-yA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.