

基于 MIKE FLOOD 模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究

侯俊^{1,2}, 陈诚^{1,2}, 郑玉磊^{1,2}, 丁伟^{1,2}, 时 间^{1,2}, 苗令占^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为科学评估平原水网地区内涝治理效果,以昆山市淀山湖镇为研究对象,基于 MIKE FLOOD 模型,耦合一维河网、二维地形和一维管网模拟了平原水网地区城镇内涝情况。采用实测降雨数据对模型进行了率定和验证,并模拟了2年一遇、5年一遇、10年一遇和20年一遇4种重现期降雨条件下现状和治理后的最大淹没水深。模拟结果表明:20年一遇降雨条件下内涝范围变化明显,其余3种重现期降雨条件下内涝范围变化不明显;对于降雨重现期较小条件下的城市内涝治理,应优先考虑管网改造,而针对短历时的强暴雨事件,应优先考虑海绵城市设施建设改造;为了应对不同重现期、短历时降雨造成的城市内涝风险,应在管网改造的基础上配合海绵城市设施建设改造。

关键词:平原水网;内涝治理;海绵城市设施;MIKE FLOOD 模型;淀山湖镇

中图分类号:P333.2;TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2024)06-0041-07

Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model//HOU Jun^{1,2}, CHEN Cheng^{1,2}, ZHENG Yulei^{1,2}, DING Wei^{1,2}, SHI Jian^{1,2}, MIAO Lingzhan^{1,2}(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To scientifically evaluate the effectiveness of waterlogging control in plain water network areas, taking Dianshanhu Town in Kunshan City as a study area, the MIKE FLOOD model, which integrates a one-dimensional river network, a two-dimensional terrain, and a one-dimensional drainage network, was used to simulate urban flooding in the plain water network area. The model was calibrated and validated using observed rainfall data, allowing for accurate simulations of maximum inundation depths in current situation and after treatment under four different rainfall return periods: 2-year, 5-year, 10-year, and 20-year events. The simulated results indicate that the inundation area changes significantly under the 20-year return period, while it shows no substantial variation under the other three return periods. For urban waterlogging control under smaller rainfall return periods, priority should be given to upgrading drainage networks, while for intense short-duration storms, the construction of sponge city facilities should take precedence. To address urban flood risks caused by various return periods and short-duration rainfall, a combination of drainage system upgrades and sponge city facilities is recommended.

Key words: plain water network; waterlogging control; sponge city facilities; MIKE FLOOD model; Dianshanhu Town

城市化的迅速发展导致城市内涝问题日益严重、洪涝灾害频发,MIKE 模型以其优秀的城市洪涝模拟与评估能力为防洪排涝以及海绵城市建设效果评估提供了重要的技术支撑。王英^[1]以北京科学城为例构建了 MIKE FLOOD 耦合模型模拟管网和地表水的交互过程,根据径流系数、管网中水位和流量、排水口流量和历史淹没水深对模型进行了率定和验证,结果表明模型具有较高的可信度;任梅芳

等^[2]耦合 MIKE URBAN 和 MIKE21 模型模拟了济南市历下区立交桥区域暴雨内涝积水情况;王天泽等^[3]利用 MIKE FLOOD 构建了一维河道和二维研究区的大尺度、高精度耦合模型,准确模拟了河道洪水漫溢及洪水淹没情况;Dikici 等^[4]利用 MIKE 模型生成 Alibeykoy 流域的水文模型,得到了汛期50年一遇和100年一遇的洪水深度和洪水风险范围图;Li 等^[5]利用 MIKE FLOOD 模型评价了雨水花

基金项目:国家自然科学基金项目(52370164);江苏省重点研发计划项目(BE2022834)

作者简介:侯俊(1979—),男,教授,博士,主要从事河湖水质改善与生态修复研究。E-mail:hjy_hj@hhu.edu.cn

园对水量及水质的影响,结果表明雨水花园对水量和水质均有较好的控制效果,但随着降雨强度的增大效果会降低;Ramos 等^[6]利用 MIKE SHE 模型对葡萄牙 Seixal 地区洪水系统进行建模,检验了洪水风险分析的准确性和减灾技术的适用性;Ahn 等^[7]利用二维水动力模型 MIKE21fm 对法国 Lower Var 河谷地区的城市淹没面积进行了预测,分析了不同上游流量情景下的淹没面积和河流流量变化,并提出了计算网格分辨率更高的内涝分析模型。可见使用 MIKE 模型可以较为精确地模拟城市现有排水条件下的内涝情况,然而目前使用 MIKE 模型评估平原水网地区内涝治理效果的研究较少。本文以典型平原水网地区——昆山市淀山湖镇为例,运用 MIKE 水动力模型模拟暴雨情形下城镇积水情况,分析区域内涝并对比不同暴雨重现期对内涝治理效果的影响,以期为平原水网地区海绵城市改造以及城市内涝风险评估提供参考。

1 研究区概况

淀山湖镇位于江苏昆山市东南部(31°08′05″N~31°13′20″N,120°57′45″E~121°04′10″E),其西南为淀山湖,所在区域属北亚热带南部季风气候区,气候温和湿润,四季分明,光照充足,雨量充沛。淀山湖镇地处太湖流域下游的阳澄淀淤区,由于存在梅雨和台风暴雨两种雨型,洪涝灾害频繁,主要易涝积水点分布如图 1 所示。

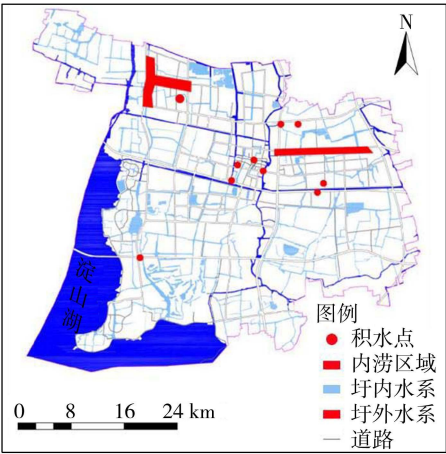


图 1 淀山湖镇主要易涝积水点分布

2 模型构建

淀山湖镇洪涝模型构建步骤如下:①采用 MIKE11 模型概化淀山湖河网;②采用 MIKE21 模型构建淀山湖镇的土地、道路以及建筑的分布情况;③采用 MIKE URBAN 模型模拟雨水的地表径流情况与在城市管网中的运行规律;④采用 MIKE

FLOOD 模型城市管网耦合工具将 MIKE URBAN 和 MIKE21 自动耦合,通过自动耦合工具连接 MIKE URBAN 的排水口和淀山湖河网,将 192 个排水口连接到最近的河道断面上,并耦合 MIKE11 的河道和 MIKE21 的地形,建立两个侧向连接即河道两岸的侧向连接,最终得到内涝情况。

2.1 MIKE11 模型

淀山湖镇临近淀山湖,境内河流湖荡纵横交错,是典型的江南平原水网地区,水流方向总体为向南。现状研究区总水域面积 6.26 km²,主要河道千灯浦、道褐浦、石浦江均由北向南流入淀山湖。将 shapefile 格式的河道文件导入 MIKE11 模型中,绘制成河道,通过已有数据制作河网文件、断面文件、边界文件和参数文件,通过耦合 4 个文件完成对淀山湖一维河网的模拟。所构建的 MIKE11 河网如图 2 所示。

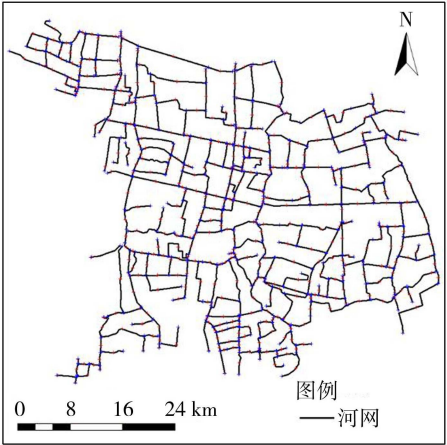


图 2 MIKE11 模型概化的河网

2.2 MIKE21 模型

淀山湖镇地处长江三角洲太湖平原前缘,地势平坦,自然坡度较小,地势由西南向东北倾斜,西南部稍高,北部及东部沿吴淞江一带较低。将 CAD 格式的高程点文件转化为 MIKE 格式的地形文件,插入建筑物和道路,以此来反映真实的城镇地形。选择 MIKE21 模型的水动力模块模拟研究区内涝,导入 MIKE 格式的地形文件,时间步长设置为 1 min,时间步数为 7200 步。所构建的 MIKE21 地形如图 3 所示。

2.3 MIKE URBAN 模型

排水管网模拟计算使用 MIKE URBAN 的 CS 模块,分为降雨径流过程模拟计算和管道内水流水力模拟计算两步,降雨径流计算过程是将降雨后的地表产流和汇流过程分散为单元时间长度内的产汇流^[8],产汇流的计算结果作为管道内水流水力模拟计算的边界条件,模型利用圣维南方程组进行求解计算。将现有的 4780 个检查井、192 个排水口和管网数据导入模型,对所有的节点赋直径值,人工导入

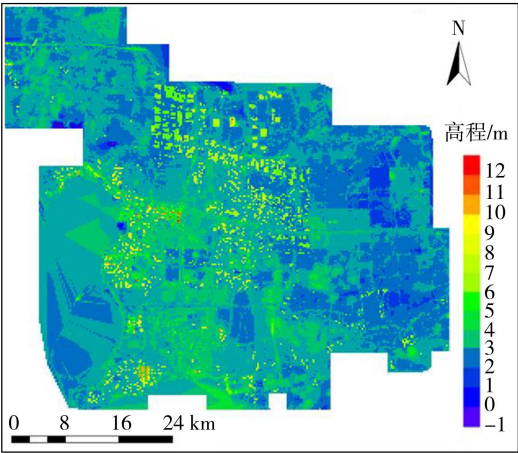


图3 MIKE21 模型构建的地形

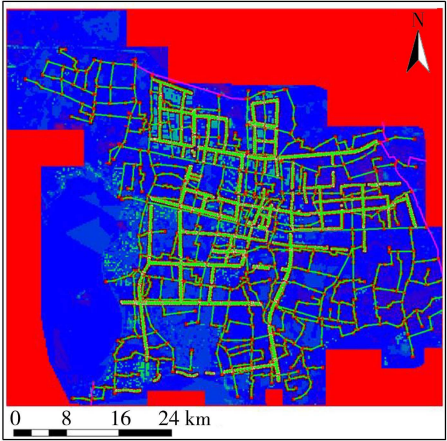


图5 MIKE FLOOD 模型耦合的结果

绘制好的集水区边界,自动划分集水区。根据已有相关研究成果^[9-10]给集水区参数赋值,选择时间面积曲线,不透水率为60%,水文参数中平均表面流速为0.3 m/s,削减系数为0.9。插入根据暴雨模拟公式计算得到的时间序列文件,给定暴雨径流边界条件后即可进行暴雨径流模型测试和管网模型测试。构建的 MIKE URBAN 管网如图4所示。

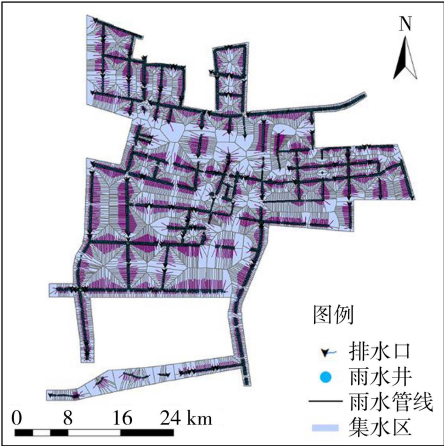


图4 MIKE URBAN 模型概化的管网

2.4 MIKE FLOOD 模型耦合

MIKE FLOOD 模型用于耦合 MIKE11、MIKE21 和 MIKE URBAN,耦合结果如图5所示。MIKE URBAN 与 MIKE21 通过 MIKE FLOOD 城市管网自动耦合工具导入的雨水井进行连接,地面雨水根据地形情况流入相应的雨水管网中。MIKE URBAN 与 MIKE11 通过导入的排水口进行连接,管网中的水通过排水口流入河道,以此模拟在不同降雨条件下河道中的水体是否顶托。MIKE11 和 MIKE 21 通过左右岸连接的方式进行河两岸网格与水量交换^[11]。

2.5 模型验证

采用昆山市淀山湖镇 2023 年 7 月 20 日 12:00—14:00 实测降雨对模型进行验证。此次降雨淀山湖镇部分地区出现累计 200 mm 以上、个别地

区 100 mm/h 的强降水,部分地区出现累计 200 mm 以上的积水,多处积水严重。根据实测降雨数据,模型模拟得到积水点最大淹没水深(表1),通过与实测最大淹没水深对比来验证模型。

表1 各积水点最大淹没水深验证结果

积水点	实测值/cm	模拟值/cm	绝对误差/cm	相对误差/%
民和路	28.3	29.2	0.9	3.18
新兴路	23.3	22.1	-1.2	-5.15
杨家角路	18.9	20.3	1.4	7.41
北苑路	26.4	25.4	-1.0	-3.79
老街	24.6	26.4	1.8	7.32
中山路	19.7	18.6	-1.1	-5.58
党校	22.6	24.8	2.2	9.73
东湖水岸	17.5	15.9	-1.6	-9.14
双马路	15.2	13.5	-1.7	-11.18
新乐路	21.9	20.5	-1.4	-6.39
万园路	30.6	28.7	-1.9	-6.21

根据表1的验证结果可知,平均绝对误差为1.47 cm,该值在合理的范围内且数值较小,表明预测值有较高的合理性^[12]。根据图6各积水点最大淹没水深的实测值与模拟值拟合曲线可知,决定系数 R^2 为0.907 9,表明预测值有较高的可信度^[13]。可见,构建的模型具有较高的可信度与合理性,可用于后续的洪涝分析。

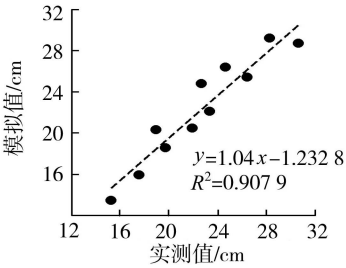


图6 各积水点最大淹没水深的实测值与模拟值拟合曲线

3 结果与讨论

3.1 降雨情景设计

国内外常见的短历时设计雨型的推求方法有芝

加哥法、Pilgrim 法、Cordery 法等方法^[14]。2017 年 4 月 12 日,昆山市人民政府公布了昆山市暴雨强度公式及设计雨型,暴雨强度公式为

$$i = A(1 + c\lg T_M)/(t + b)^n \tag{1}$$

式中: i 为设计暴雨强度,mm/min; t 为降雨历时,min; T_M 为设计重现期,a; A 、 b 、 c 、 n 为公式的参数,取值如下:历时为 120 min 时, $A=9.5336$, $b=5.9828$, $c=0.5917$, $n=0.6383$,同时,雨峰系数 $r=0.438$ 。

采用芝加哥法推求设计雨型,可以得出 2 年一遇、5 年一遇、10 年一遇和 20 年一遇 120 min 降雨强度曲线如图 7 所示。

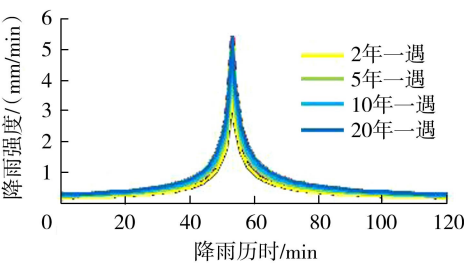


图 7 4 种重现期的设计降雨

3.2 内涝模拟及分析

图 8 为淀山湖镇不同降雨重现期 120 min 短历

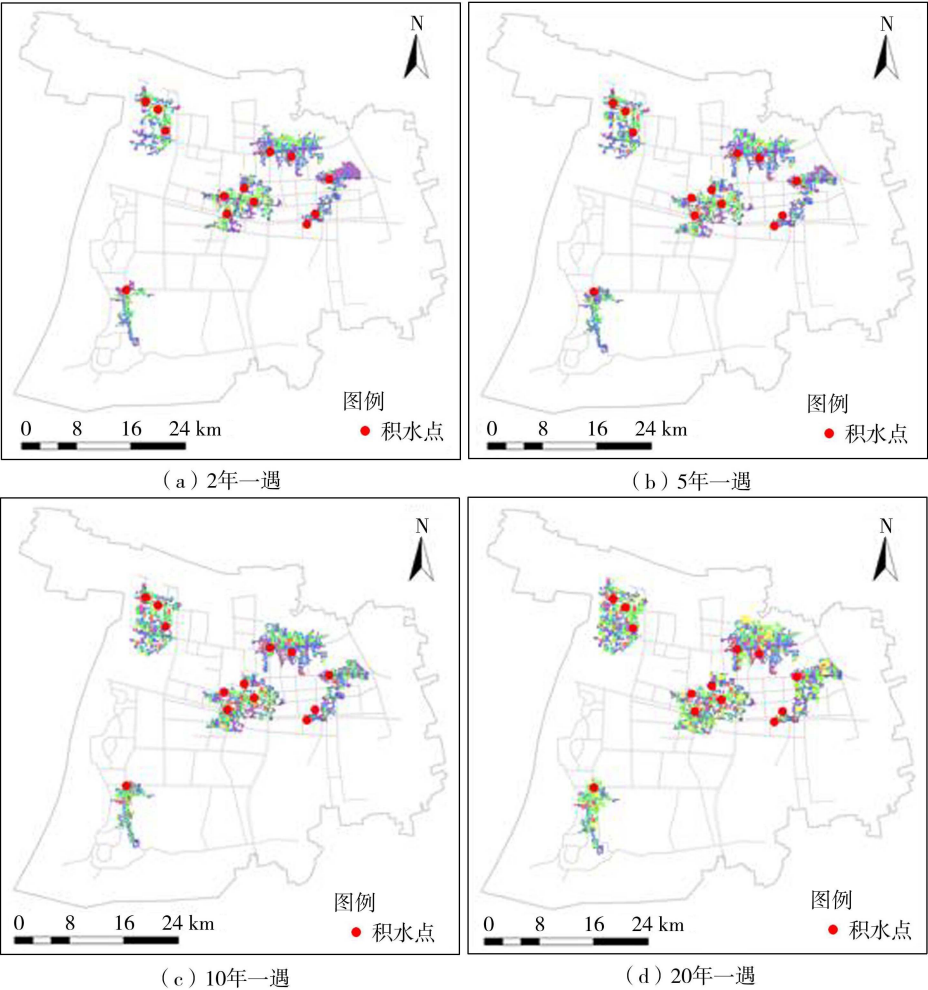


图 8 不同降雨重现期条件下的积水点

时设计降雨情景下的积水模拟结果,主要积水点模拟淹没水深如表 2 所示。

表 2 主要积水点模拟淹没水深

积水点	淹没水深/m			
	2 年一遇	5 年一遇	10 年一遇	20 年一遇
民和路	0.312	0.424	0.584	0.806
新兴路	0.295	0.405	0.554	0.775
杨家角路	0.334	0.455	0.608	0.837
北苑路	0.345	0.475	0.639	0.841
老街	0.347	0.483	0.652	0.862
中山路	0.301	0.412	0.561	0.784
党校	0.302	0.424	0.577	0.794
东湖水岸	0.355	0.495	0.667	0.861
双马路	0.374	0.506	0.685	0.882
新乐路	0.315	0.423	0.596	0.818
万园路	0.323	0.434	0.614	0.825

模拟结果显示主要积水点有 11 个,其中 2 年一遇、5 年一遇、10 年一遇、20 年一遇降雨重现期条件下淹没水深分别为 0.30~0.38、0.41~0.51、0.55~0.69、0.77~0.89m。降雨重现期从 2 年一遇增长到 20 年一遇,淹没水深不断增大且增长幅度逐渐变大。由图 8 可以看出积水点大多分布在东北地区一带,这是因为淀山湖镇整体地势由西南向东北倾斜,

西南部地势稍高,可见地势对洪涝灾害的影响较大;此外,河湖密集的南部基本未出现积水点,表明河湖的蓄水调节能力对洪涝灾害也有显著的影响。

3.3 内涝风险等级评估

国内内涝风险等级划分主要考虑了淹没水深和积水时间对行人的危害程度,而积水点的水流速度也与行人安全息息相关,本文借鉴国外内涝风险等级计算方法^[15],通过淹没水深、水流速度和GB 50014—2021《室外排水设计标准》中修正的水深危害参数计算危险性指数:

$$H = d(v + 0.5) + D \tag{2}$$

式中: H 为危险性指数; d 为淹没水深,m; v 为流速,m/s; D 为水深危害参数, $d \leq 0.15$ m 时 $D = 0.5$, $d > 0.15$ m 时 $D = 1.0$ 。

根据危险性指数内涝区域分为低风险区($H < 0.75$)、中风险区($0.75 \leq H \leq 1.25$)和高风险区($H > 1.25$)3类。根据20年一遇降雨条件下模拟结果进行内涝风险等级评估,结果如图9所示。其中民和路积水点、老街积水点和党校积水点为高风险区,面积为0.0597 km²,中风险区面积为0.2082 km²,分布于新兴路、中山路等8个积水点区域,其余1.2319 km²区域为低风险区。

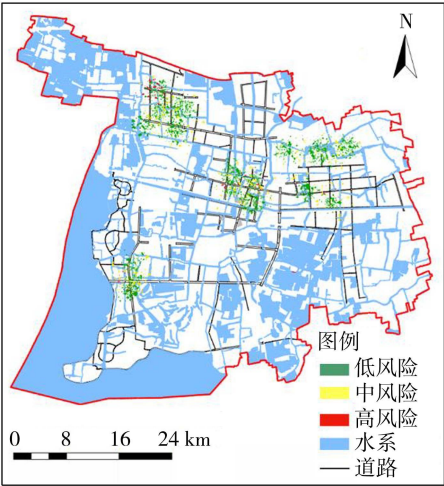


图9 内涝风险等级评估结果

3.4 内涝治理及效果评估

采用 MIKE 模型对设定的不同治理方案进行模拟,对比分析不同改造方案的治理效果,可为内涝治理提供参考依据。考虑淀山湖镇的地势,分别选取民和路、双马路、党校和万园路4个分布在淀山湖镇不同地势及不同汇水范围的积水点作为典型积水点进行模拟分析来评估不同改造方案的治理效果,由于淀山湖镇处于平原河网区域,地势起伏不大且汇水面积的分布较为均匀,对比这4个典型积水点,可以得出整个淀山湖镇的内涝变化规律。

3.4.1 方案一:管道改造

结合积水点实际情况,对积水点周围的雨水管网进行改造升级,增大雨水管管径有利于削减溢流节点数量和负载运行的管道数量^[16],增大雨水管集水容量,延长雨水在管网中的停留时间,减少管网因堵塞而产生排水不畅的情况。典型积水点区域管网局部改造方案如图10所示。

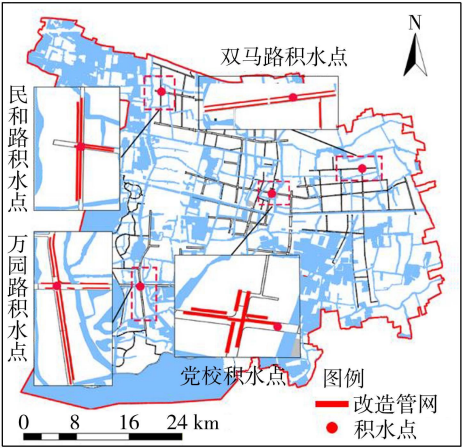


图10 典型积水点区域管网局部改造方案

方案一遵循以最小的工程费用获取最佳效益比的原则,对比管径扩大20%、30%和50%的改造效果。对3种不同管径改造效果的模拟结果表明,积水点淹没水深的削减效果是管径扩大50%最好、管径扩大30%次之、管径扩大20%最差;在2年一遇、5年一遇、10年一遇、20年一遇降雨重现期条件下,管径扩大30%与扩大20%削减比的差值约分别为8%、7%、5%和4%,而管径扩大50%与扩大30%削减比的差值约分别为4%、2.2%、1.5%和1%。综合考虑工程造价和改造效果,管径扩大30%较为合理。在重现期不大于5年一遇的降雨条件下,管网改造对各积水点淹没水深削减效果明显。

图11为雨水管网管径扩大30%后的淀山湖镇

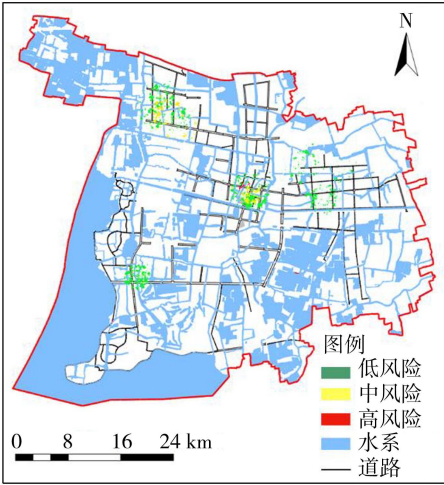


图11 方案一改造后内涝风险等级评估结果

内涝风险等级评估结果,其中高风险区为老街积水点和党校积水点,面积为 0.0197 km^2 ,民和路积水点已无高风险区;中风险区面积为 0.1143 km^2 ,位于新兴路、中山路等7个积水点区域;低风险区面积为 0.8247 km^2 ,万园路积水点、新乐路积水点和双马路积水点仅存低风险区。管网改造对内涝中高风险区有一定的削减作用。

3.4.2 方案二:海绵城市设施建设改造

植草沟、透水铺装和绿色屋顶等都具有滞留雨水削弱雨水径流的功能^[17]。透水铺装和绿色屋顶能有效削弱径流总量和径流峰值,植草沟和生物滞留池能有效且稳定地控制雨水径流^[18]。本文依据《昆山市海绵城市专项规划》,采用植草沟、透水铺装、绿色屋顶和雨水花园等海绵城市设施对4个典型积水点区域进行改造,海绵城市设施布置如图12所示。

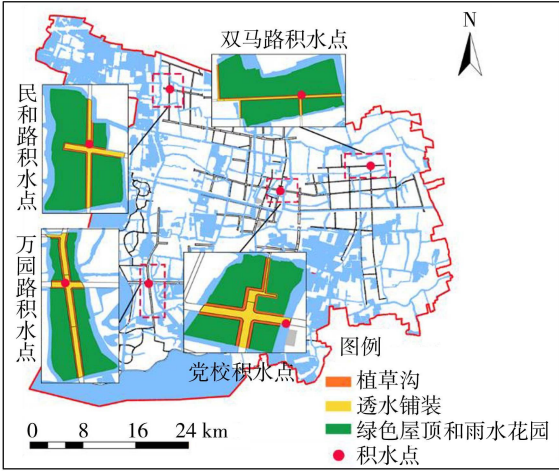


图12 海绵城市设施布置示意图

采用 MIKE FLOOD 模型对海绵城市设施建设改造效果进行评估时,对不同土地利用类型不透水率进行概化设置,绿色屋顶和雨水花园、植草沟、透水铺装路面、其他建设用地不透水率分别取 0.15、0.15、0.40 和 0.80^[19-20]。

模型模拟结果表明,采用海绵城市设施建设改造后民和路积水点、双马路积水点、党校积水点和万园路积水点淹没水深的削减值分别在 0.17~0.21、0.14~0.17、0.15~0.17、0.15~0.17 m 之间,且海绵城市设施能直接延缓最大淹没水深出现的时间。海绵城市设施建设通过改变建设用地的土地利用类型,减小不透水率和雨水地表径流,在削减积水点淹没水深的同时,还能够有效延缓最大淹没水深出现的时间,所以针对短历时的强暴雨事件,应优先考虑海绵城市设施建设改造。

图13为海绵城市设施建设改造后的淀山湖镇内涝风险等级评估结果。研究区内已无高风险区,

中风险区面积为 0.1263 km^2 ,低风险区面积为 0.6473 km^2 。由于内涝危险性指数与淹没水深和流速有关,而经过海绵城市设施建设改造后,在削减地表淹没水深的同时,地表径流雨水的流速因下垫面变化而降低,所以海绵城市设施建设改造相较于管网改造的内涝风险有所降低,但中低风险区还大量存在。

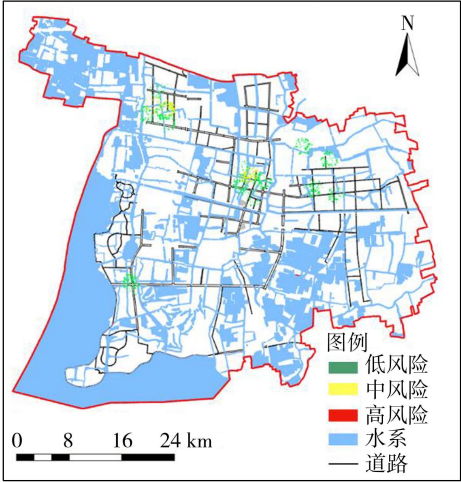


图13 方案二改造后内涝风险等级评估结果

3.4.3 方案三:管网改造与海绵城市设施建设改造结合

为了能够应对不同重现期、短历时降雨造成的城市内涝以及降低城市内涝风险,应该将能够增强排水能力的管网改造和能够延缓最大淹没水深出现时间的海绵城市设施建设改造相结合,所以方案三为将管径扩大 30%与海绵城市设施(植草沟、透水铺装、绿色屋顶和雨水花园)建设改造相组合的方案。模型模拟结果表明,在 2 年一遇、5 年一遇、10 年一遇和 20 年一遇降雨重现期条件下,方案一淹没水深的削减比分别为 59.38%、41.36%、25.59% 和 17.85%,方案二约分别为 52.94%、36.77%、26.28% 和 19.11%,方案三约分别为 89.14%、79.06%、61.45% 和 48.42%。对比方案一和方案二可以发现,对于降雨重现期在 5 年一遇以内的城市内涝治理,管网改造对积水点淹没水深的削减效果更好,而对于降雨重现期大于 5 年一遇的城市内涝治理,海绵城市设施建设改造略有优势。与方案一、方案二相比,管网改造与海绵城市设施建设改造结合的内涝治理方案三能更大程度削减积水点淹没水深。此外,相较于管网改造方案,海绵城市设施建设改造还能在一定程度上延缓最大淹没水深出现时间,所以方案二和方案三对于最大淹没水深出现的时间都有相同程度的延缓。

图14为方案三改造后的淀山湖镇内涝风险等级评估结果。研究区内已无中高风险区,仅新兴路

积水点、民和路积水点和中山路积水点附近存在低风险区,低风险区面积为 0.2417 km²。由此可以看出,管网改造和海绵城市设施建设改造两种措施结合能有效降低城市内涝风险。

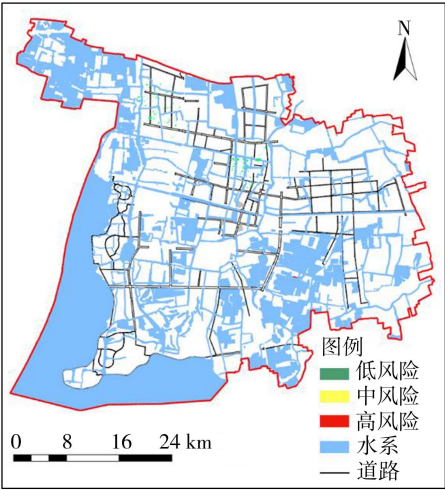


图 14 方案三改造后内涝风险等级评估结果

4 结 语

本文以昆山市淀山湖镇为研究对象,基于 MIKE FLOOD 模型对平原水网地区的内涝治理问题进行了模拟分析,根据不同的降雨情景提出了管道改造和海绵城市设施建设改造等内涝治理方案。模型模拟结果表明:随着降雨重现期的增大,淹没水深不断增大且增长幅度逐渐变大,积水点大多分布在地势低洼以及河湖附近的区域;对比不同管径的管网改造方案,在考虑最佳效益比的原则下,管径扩大 30%较为合理,在降雨重现期不大于 5 年一遇的降雨条件下,管网改造对各积水点淹没水深削减效果明显;针对短历时的强暴雨事件,应优先考虑海绵城市设施建设改造;为了应对不同重现期、短历时降雨造成的城市内涝,应将管网改造削减淹没水深的优势与海绵城市设施延缓最大淹没水深出现时间的优势相结合,在管网改造的基础上配合海绵城市设施建设改造能有效改善城市内涝风险,在进行海绵城市设施建设改造的同时,还应充分利用河湖的蓄水功能,发挥大自然对内涝治理的功效。

参考文献:

[1] 王英. 基于 MIKE FLOOD 的城区雨洪模拟与内涝风险评估[D]. 邯郸:河北工程大学,2018.

[2] 任梅芳,徐宗学,初祁,等. 济南市历下区立交桥区域暴雨内涝积水模拟[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(5):9-15. (REN Meifang, XU Zongxue, CHU Qi, et al. Simulation of rainstorm waterlogging processes at the Lixia overpass bridge in Ji'nan City[J]. South-to-North Water

Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5):9-15. (in Chinese))

[3] 王天泽,王远航,马帅,等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的洪水淹没风险分析:以北京市某科学城为例[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(7):1-17. (WANG Tianze, WANG Yuanhang, MA Shuai, et al. MIKE FLOOD coupling model-based flood inundation risk analysis:a case of a science city in Beijing[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022,53(7):1-17. (in Chinese))

[4] DIKICI M, KAZEZYILMAZ-ALHAN C M, GÜLBAZ S. Flood hazard assessment for alibeyköy watershed in istanbul with mike nam and Mike21[J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2022,21(3):399-411.

[5] LI Jiake,ZHANG Bei,LI Yajiao,et al. Simulation of rain garden effects in urbanized area based on MIKE FLOOD[J]. Water,2018,10(7):860.

[6] RAMOS H M, BESHARAT M. Urban flood risk and economic viability analyses of a smart sustainable drainage system[J]. Sustainability,2021,13(24):13889.

[7] AHN J, NA Y, PARK S W. Development of two-dimensional inundation modelling process using MIKE21 model[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2019, 23(9):3968-3977.

[8] 王丹. 基于 MIKE 模型的西安市曲江新区城市内涝模拟研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.

[9] 韩君良. 基于 Mike Urban 的小城市排水内涝规划[D]. 杭州:浙江工业大学,2015.

[10] 李品良,覃光华,曹冷然,等. 基于 MIKE URBAN 的城市内涝模型应用[J]. 水利水电技术,2018,49(12):11-16. (LI Pinliang, QIN Guanghua, CAO Lingran, et al. Application of MIKE URBAN-based urban waterlogging model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018,49(12):11-16. (in Chinese))

[11] 蒋明. 新暴雨形势下上海市设计暴雨雨型研究[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版),2015,28(2):69-73. (JIANG Ming. Study of Shanghai design rainstorm profile under the new rainstorm situation[J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Sciences), 2015,28(2):69-73. (in Chinese))

[12] 陈泽元,徐波,储冬冬,等. 基于信号残差修正与 PSO-RVM 的混凝土拱坝位移组合预测模型[J]. 水电能源科学,2024,42(2):142-146. (CHEN Zeyuan, XU Bo, CHU Dongdong, et al. Combined prediction model of concrete arch dam displacement based on signal residual correction and PSO-RVM [J]. Water Resources and Power,2024,42(2):142-146. (in Chinese))

(下转第 70 页)

[22] 连晓晗,马永强,刘真,等. 基于 PSO-GRU 神经网络的青椒生长期需水预测[J]. 水利信息化,2023(1):33-39. (LIAN Xiaohan, MA Yongqiang, LIU Zhen, et al. Prediction of water demand in green pepper growth period based on PSO-GRU neural network[J]. Water Resources Informatization,2023(1):33-39. (in Chinese))

[23] 赵乃刚,邓景顺. 粒子群优化算法综述[J]. 科技创新导报,2015,12(26):216-217. (ZHAO Naigang, DENG Jingshun. Overview of particle swarm optimization algorithms [J]. Science and Technology Innovation Herald,2015,12(26):216-217. (in Chinese))

[24] ANSARI S, AYOB A, HOSSAIN L M S, et al. Particle swarm optimized data-driven model for remaining useful life prediction of lithium-ion batteries by systematic sampling [J]. Journal of Energy Storage,2022,56:106050.

[25] FIELDING B, ZHANG Li. Evolving image classification architectures with enhanced particle swarm optimisation [J]. IEEE Access,2018,6:68560-68575.

[26] 唐晓灵,刘嘉敏. 基于 PSO-LSTM 网络模型的建筑碳排放峰值预测[J]. 科技管理研究,2023,43(1):191-198. (TANG Xiaoling, LIU Jiamin. Forecast of peak carbon emissions of buildings based on PSO-LSTM model [J]. Science and Technology Management Research,2023,43(1):191-198. (in Chinese))

[27] 徐嘉远,邹磊,夏军,等. TVGM-LSTM 耦合模型及其径流模拟效果分析[J]. 水资源保护,2023,39(6):104-110. (XU Jiayuan, ZOU Lei, XIA Jun, et al. TVGM-LSTM coupling model and its runoff simulation effect analysis [J]. Water Resources Protection,2023,39(6):104-110. (in Chinese))

[28] 田焯,谭伟丽,王国庆,等. LSTM 变体模型在径流预测中的性能及其可解释性[J]. 水资源保护,2023,39(3):188-194. (TIAN Ye, TAN Weili, WANG Guoqing, et al. Performance of variant LSTM models in runoff prediction and their interpretability [J]. Water Resources Protection,2023,39(3):188-194. (in Chinese))

[29] 石卓,史东华,姚成,等. 基于径流模数的 LSTM 模型在无资料嵌套流域的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):51-57. (SHI Zhuo, SHI Donghua, YAO Cheng, et al. Application of runoff modulus-based LSTM in ungauged nested watersheds [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(3):51-57. (in Chinese))

[30] 温惠英,张东冉,陆思园. GA-LSTM 模型在高速公路交通流预测中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019,51(9):81-87. (WEN Huiying, ZHANG Dongran, LU Siyuan. Application of GA-LSTM model in highway traffic flow prediction [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2019,51(9):81-87. (in Chinese))

[31] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Unsupervised coding with Lococode [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Artificial Neural Networks. Lausanne:Springer,1997:655.

(收稿日期:2023-11-31 编辑:俞云利)

+++++

(上接第 47 页)

[13] 林欢,钟平安,刘冠华,等. 水库汛限水位动态控制回蓄时机的确定方法研究[J]. 中国农村水利水电,2019(9):157-161. (LIN Huan, ZHONG Pingan, LIU Guanhua, et al. A method of determining the timing of water storage during dynamic control of flood limited water level in the reservoir [J]. China Rural Water and Hydropower,2019(9):157-161. (in Chinese))

[14] LIAO Daiqiang, ZHANG Qiang, WANG Ying, et al. Study of four rainstorm design methods in Chongqing [J]. Frontiers in Environmental Science,2021,9(1):639931.

[15] ZHANG Zongjia, ZENG Yiping, HUANG Zhejun, et al. Multi-Source data fusion and hydrodynamics for urban waterlogging risk identification[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2023,20(3):2528.

[16] 鲁芳. 基于 Mike Flood 模型的杭州市典型城区城市内涝管理模拟研究[D]. 宜昌:三峡大学,2022.

[17] 刘发欣,程文,刘昕,等. 海绵城市建设中低影响开发的应用及研究进展[J]. 净水技术,2022,41(9):18-25. (LIU Faxin, CHENG Wen, LIU Xin, et al. Research progress and application of low impact development in sponge city construction [J]. Water Purification Technology,2022,41(9):18-25. (in Chinese))

[18] 谢鹏,宫永伟,仇志铭,等. 多孔纤维棉在绿色屋顶中的适配性试验研究[J]. 水资源保护,2023,39(3):237-245. (XIE Peng, GONG Yongwei, QIU Zhiming, et al. Experimental study on suitability of porous fiber cotton in green roofs [J]. Water Resources Protection,2023,39(3):237-245. (in Chinese))

[19] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 福州晋安河片区海绵改造对城市内涝的影响[J]. 水资源保护,2023,39(1):83-92. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Influences of sponge reconstruction of Jin ' an River drainage district in Fuzhou City on urban flooding/ waterlogging [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):83-92. (in Chinese))

[20] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):33-39. (in Chinese))

(收稿日期:2023-10-27 编辑:熊水斌)