

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230006

平原河网城市管网排水能力影响因素模拟研究

王 妍^{1,2}, 朱桂娥¹, 朱 勇¹, 王 岗²

(1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 我国平原河网城市的两级排涝模式常存在标准不衔接问题, 致使强降雨发生时, 管网系统的水力特性、排水能力受降雨强度和承泄水体水位的双重影响, 涝水外排困难。为此, 以苏州工业园区的市政排水系统与水利排涝系统为例, 基于SWMM模拟多情景洪涝过程, 分析得出河道水位在1.70~2.30 m之间时, 研究区域积水的主要原因是现状管网系统自身能力不足, 河道水位加剧了积水情况; 当水位超过2.30 m并不断上涨时, 管网系统排水能力骤减, 河道水位逐渐成为制约管道过流能力、加重积水程度的主要因素, 建议研究区域河道排涝控制最高水位宜在2.30~2.32 m左右。该结论可为城市河道水位调控以提高城市排水防涝能力提供参考。

关键词: 河道水位; 管网排水能力; SWMM模型; 水力坡降

中图分类号: TU992; TV732⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0115-04

1 引言

在全球变暖的背景下, 随着我国城市化进程加速演进^[1], 城市排水系统安全运行压力加大、内涝问题日益突出^[2]。同时, 我国平原河网地区城市排涝模式通常由市政排水和水利除涝两部分构成^[3], 水利除涝系统承纳市政排水系统所汇集的涝水并将其排至外江, 由于二者在规划设计上往往存在标准不衔接的问题, 致使强降雨发生时涝水的外排常受到降雨强度和承泄水体水位的共同影响。为应对日益严重的城市洪涝问题, 针对平原河网地区排涝模式已进行了大量研究。如陆敏博等^[4]结合推理公式法和数学模型法评估了管道自由出流和淹没出流状态雨水系统的排水能力; 谢华等^[3]基于不同历时暴雨之间的关系得出了一种市政排水与水利除涝设计暴雨重现期的衔接关系; 汉京超等^[5]分析了沿海平原河网城市排水防涝面临的典型问题并提出了系统应对策略。然而, 在针对管网排水能力的影响因素研究方面还有待进一步完善。鉴此, 本文以苏州工业园区现有管网排水系统和河道排涝系统为基础, 依托SWMM建立雨洪模型, 通过情景模拟分析降雨强度与河道水位对管网系统水力特性和排水能力

的影响, 以探求强降雨发生时管网系统能充分发挥自主排水能力的河道控制水位。

2 研究区域概况及模型构建

2.1 研究区域概况

苏州工业园区位于太湖流域阳澄淀泖区, 总面积278 km², 北依阳澄湖, 南邻苏申外港线—吴淞江一线, 境内河道纵横, 湖泊众多, 是苏州市运东地区的主要开敞式防洪地区。苏州工业园区所在片区的洪涝出路主要为阳澄区通江河道和吴淞江排江, 随着长三角区域城市化强度增加和周边城市防洪治涝能力的提高, 该片区易形成高水围困、涝水外排受阻的状况。研究区域警戒水位为1.80 m(黄海基面, 下同)、保证水位为2.10 m、现状防洪水位为2.62 m。据调查统计, 研究区域路肩低于2.82 m的道路约占29%, 排水管渠沿路肩敷设就近入河, 设计水力坡降一般为1‰, 距离出水口500~800 m, 多采用淹没式自流排放。

2.2 SWMM简介

SWMM模型已广泛应用于城市暴雨径流估算、城市排水系统有效性评估及模型参数识别等方面^[6-8]。本研究管网汇流模拟采用动力波法, 该方法对圣维南方程组进行完全求解, 具有较高的

收稿日期: 2023-01-02, 修回日期: 2023-02-01

作者简介: 王妍(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为城市防洪排涝, E-mail: wangyan_2151@163.com

通讯作者: 朱桂娥(1975-), 女, 教授级高级工程师, 研究方向为水利水电工程规划, E-mail: 570515106@qq.com

准确性,能有效模拟下游顶托效应、逆流过程,其控制方程矩阵形式为:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{S} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{U} = [A, Q]^T$
 $\mathbf{F} = [Q, Q^2/A + gI]^T$; $\mathbf{S} = [0, gA(S_0 - S_f)]^T$
 式中, \mathbf{U} 为流体变量; \mathbf{F} 为 x 方向的通量; t 为时间; x 为流向距离; \mathbf{S} 为源项的矢量; A 为管渠横截面积; Q 为流量; g 为重力加速度; I 为压力项,与水深沿管渠长度的变化成正比; S_0 为管渠坡度; S_f 为摩擦力。

2.3 SWMM 模型建立及率定

根据苏州工业园区河、管网资料及下垫面情况,在二级排水分区的基础上按汇流、河道、地形、街道等实际情况将研究区域划分为 602 个子汇水区,概化检查井 8 422 个,排放口 608 个,管道 8 436 段,总长度 210.30 km,苏州工业园区概化结果见图 1。

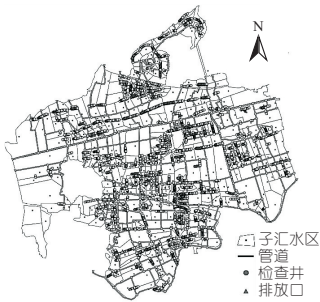


图 1 苏州工业园区概化
 Fig. 1 Overview of Suzhou industrial park

SWMM 模型涉及较多参数,研究通过实测资料获得坡度、管径和管长等确定性参数。同时,根据 SWMM5.2 用户手册的参数设定参考范围,结合研究区域本底条件对糙率、下渗等不确定性参数进行初步拟定后反复调试校验。经调试校验,设置苏州工业园区 SWMM 模型最大、最小入渗速率分别为 40.90、5.27 mm/h,衰减系数为 3.5 h⁻¹,概化管道为混凝土管,设置管道糙率为 0.013,不透水地表和透水地表的糙率系数分别设置为 0.02、0.20,不透水和透水区的注蓄量分别为 1.20、2.50 mm。此外,研究管渠超载演算采用激波捕捉混合流模型 Preissmann 窄缝法,假设满流管道顶部与一个假想的狭窄缝,该狭缝对大气开放,将圣维南方程组变换为与混合流质量动量等效的方程,完成管网超载汇流演算。水头损失计算采用达西-魏斯巴赫公式,设置时间步长为 30 s,每 5 min 输出模拟结果,总模拟时长为 4 h(含 2 h 退水时长)。由于缺少实测的径流资料,根据实测降雨-积水位置进行率定调试。以

2021 年 10 月 10 日的某场 720 min 实测降雨进行率定,苏州工业园区星海实小站降雨量为 293.1 mm。模拟积水位置与实测积水位置对比见图 2,率定结果显示模拟积水位置与实测积水位置拟合度较好,该模型可用于苏州工业园区雨洪模拟分析。



图 2 模拟积水位置与实测积水位置对比
 Fig. 2 Comparison of simulated water accumulation location and measured water accumulation location

2.4 设计暴雨计算

2019 年 10 月苏州市人民政府以苏府[2019]84 号文公布的苏州市区设计暴雨强度 i 公式为:

$$i = \frac{17.7111(1 + 0.8852 \lg T_M)}{(t + 14.6649)^{0.7602}} \quad (2)$$

式中, i 为暴雨强度, L/(s · hm²); T_M 为暴雨重现期,年; t 为汇流历时, min。

采用苏州市区暴雨公式计算 120 min 短历时 1、2、3、5 年一遇设计暴雨,根据芝加哥降雨过程线进行雨程分配,雨峰系数取 0.425,计算结果分别为 51.36、65.04、73.05、83.14 mm。降雨过程线见图 3。

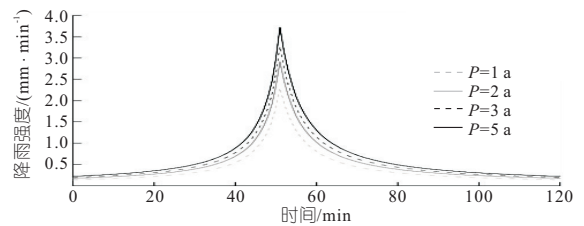


图 3 不同重现期 120 min 设计降雨过程
 Fig. 3 120 min design rainfall process with different recurrence periods

3 模拟结果与分析

3.1 分析方法与技术路线

研究以检查井是否冒溢作为评估管道排水能力的标准。同时,将管道的实际水力坡降与设计水力坡降的比值作为相对水力坡降,以此分析管道水力特性对影响因素的响应,判别制约管道过流能力的主要因素,并使结果具有对比意义。根据《室外排水设计规范》(GB 50014-2021)^[9],我国

雨水管道设计流量按重力流、满管流计算,设计水力坡降取管底坡度,由水力学原理可知,管道处于压力流状态时,若相对水力坡降大于 1,则管道的过流能力主要受其设计断面、管长、粗糙系数的影响;若相对水力坡降小于 1,管道进出口断面之间的水头损失由位置势能差提供,管道的过流能力主要受其下游控制。管网排水能力影响因素分析及河道控制水位探求技术路线见图 4。

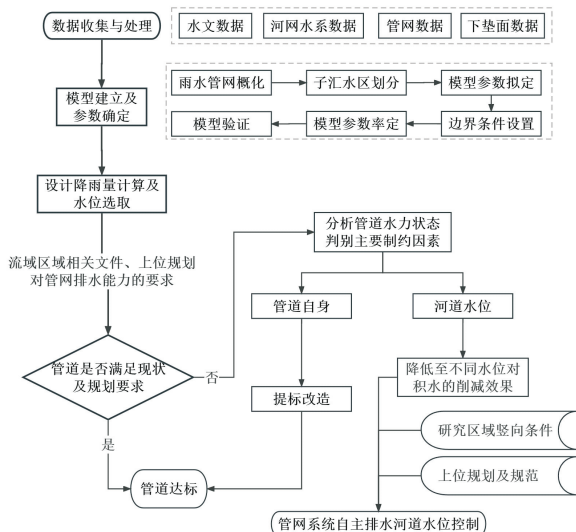


图 4 管网排水能力影响因素分析及河道控制水位探求技术路线

Fig. 4 Technical route analysis of influencing factors of drainage capacity of pipe network and controlling water level of river channel

3.2 降雨强度对管网系统排水能力的影响

1、2、3、5 年一遇四种设计降雨条件下研究区域管道水力状态统计见图 5。模拟发现,研究区域管网系统在设计防洪水位 2.62 m 淹没式自流排放时,管道基本都存在满管承压运行的现象,其

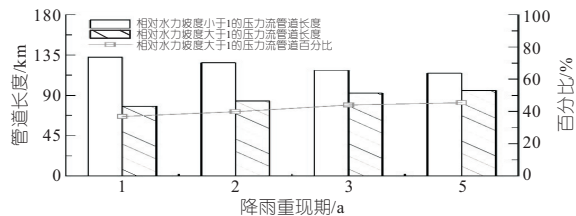


图 5 不同降雨强度管道水力状态

Fig. 5 Hydraulic status under different rainfall return periods

中相对水力坡度小于 1 状态的管道占比更大。1 年一遇降雨条件下,压力流管道中相对水力坡度大于 1 的管道占 36.94%;随着降雨强度增大,产流量增加,经地表汇流进入管网系统的径流量增多,这使相对水力坡度大于 1 的管道占比逐渐增大,即因自身过流能力不足而产生水面线高于管顶现象的管道增多,当遭遇 5 年一遇降雨强度时,压力流管道中有 45.42%的管道相对水力坡度大于 1。可见,研究区域部分现状管道设计过流能力不足,且河道高水位显著影响管道水力特性。

此外,根据《苏州市城市内涝治理实施意见的通知》(苏府办〔2022〕3 号),苏州工业园区管网系统应基本达到 3~5 年一遇的排水能力,经模拟统计,排水能力 <1、1~2、2~3、3~5、>5 年一遇的骨干管网长度占总管长比例分别为 16.23%、24.18%、10.71%、24.71%、24.17%,则现状管网有 48.88% 以上的管道排水能力不足、未达标准,建议通过增大未达标管道的设计断面、坡度,结合调整管道下游的水力状态等措施,提高研究区域管网系统的达标率。

3.3 河道水位对管网系统排水能力的影响

模拟并统计河道水位 1.70 ~ 2.50 m 条件下,相对水力坡度小于 1 的压力流管道长度占压力流管道总长的比例(图 6)并评估管网排水能力(表 1)。由图 6 可知,水位在 1.70 ~ 2.30 m 之间时,压力流管道中相对水力坡度小于 1 的比例不超过 43.49%,此时河道水位对管网系统水力特性的影响相对较小;当水位为 2.50 m 时,1、2、3、5 年一遇降雨条件下的压力流管道中分别有 50.99%、49.44%、47.29%、45.84% 的管道相对水力坡度小于 1;2.62 m 水位下超过 54.58% 的压

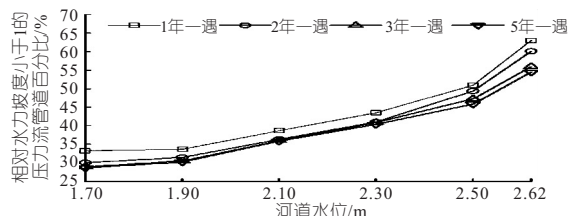


图 6 不同水位相对水力坡度小于 1 压力流管道百分比
Fig. 6 The relative hydraulic slope of different water levels is less than 1 percent of pressure flow pipes

表 1 不同河道水位管网系统排水能力

Tab. 1 Drainage capacity of pipelines at different river levels

重现期/a	河道水位 1.70 m		河道水位 1.90 m		河道水位 2.10 m		河道水位 2.30 m		河道水位 2.50 m	
	长度/km	占比/%	长度/km	占比/%	长度/km	占比/%	长度/km	占比/%	长度/km	占比/%
$P < 1$	10.49	4.99	14.83	7.05	18.74	8.91	22.31	10.61	26.14	12.43
$1 \leq P < 2$	15.64	7.43	22.11	10.51	27.91	13.27	33.24	15.81	38.96	18.52
$2 \leq P < 3$	6.92	3.29	9.79	4.66	12.36	5.88	14.72	7.00	17.25	8.21
$3 \leq P < 5$	15.97	7.60	22.58	10.74	28.53	13.56	33.97	16.15	39.81	18.93
$P \geq 5$	161.28	76.69	140.99	67.04	122.76	58.38	106.06	50.43	88.14	41.91

力流管道相对水力坡度小于 1, 此时河道水位成为制约管道过流能力的主要因素。这表明管道的水力特性与河道水位的变化密切相关, 河道水位越高, 实际过流量小于设计过流能力的管道越多。

此外, 由表 1 可知, 不满足 3 年一遇排水标准的管道长度占总管长的比例从 1.70 m 水位时的 7.43% 增加到 2.62 m 水位时的 51.12%, 同时, 排水能力大于 5 年一遇的管道占比减少 52.52%。原因在于河道水位顶托作用使末端管道水面线壅高、排水不畅, 由于压力波波速快, 一段管道中的顶托、回水效应将瞬间影响相邻管道, 相邻管道受其下游控制水头差变小、水力坡降减小, 实际过流能力达不到满流设计流量, 整个管网的过流能力将受到限制。基于苏州工业园区河网密度较高、雨水分散就近排水条件较好的本底条件, 建议通过控制现有河道水位来削减顶托作用对管网系统排水的不利影响, 以提高强降雨发生时管网系统的自排能力。

3.4 降雨强度和河道水位对管网系统排水能力的联合影响

将 2.62 m 水位作为基线情景, 比较不同降雨强度和河道水位组合条件下研究区域节点积水情况的差异, 结果见图 7。由图 7(a) 可知, 当河道水位从 2.62 m 降低到 1.70 m 时, 积水持续时间减少了约 72.35% ~ 80.84%。此外, 当水位在 2.30 m 以下时, 不同降雨重现期之间的积水持续时间减少率差异较大, 表明积水持续时间主要是受管网系统自身能力影响; 当水位高于 2.30 m 时, 等高线趋于密集, 差异较小, 表明造成积水时间长的主要原因是河道水位过高。由图 7(b) 可知, 当河道水位从 2.62 m 降低到 1.70 m 时, 积水量减少了约 46.80% ~ 67.44%, 可见控制河道水位对积水持续时间的削减效果更为明显。此外, 随着降雨重现期的减小, 河道水位轴向等高线逐渐密集, 积水量减少率从 5 年一遇降雨条件下的 23.63% ~ 46.80% 逐渐增涨到 1 年一遇降雨条件下的 35.97% ~ 67.44%, 表明控制河道水位对积水量的削减效果随着降雨重现期的增加而减

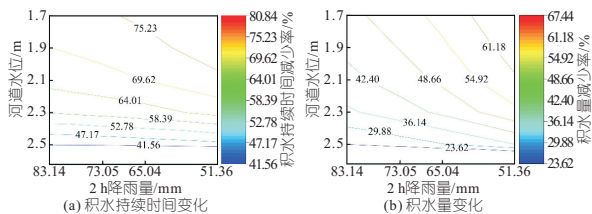


图 7 不同降雨重现期和水位组合下的积水情况变化
Fig. 7 Changes of flood under different rainfall return periods and water levels combinations

弱。由此可得, 降雨强度和河道水位对积水持续时间、积水量均有交互作用, 且将河道水位控制在 2.30 m 以下可有效降低高水位对积水的不良影响。根据《治涝标准》(SL723-2016)^[10] 考虑苏州工业园区现有竖向条件, 其河道除涝控制最高水位宜在 2.32 m 左右, 结合河道水位在 1.70~2.30 m 之间时对管网系统过流能力和积水程度影响较少的模拟结果, 以强降雨发生时现状管网系统能充分发挥自主排水能力, 将涝力尽快排出为原则, 建议研究区河道排涝控制最高水位定在 2.30~2.32 m 左右。

4 结论

依托 SWMM 建立雨洪模型, 以苏州工业园区为例, 基于现有管网排水系统和河道排涝系统模拟分析降雨强度和河道水位对管网系统水力特性和排水能力的影响。结果表明, 河道水位在 1.70~2.30 m 之间时, 研究区域积水的主要原因是现状管网系统自身能力不足, 河道水位加剧了积水情况; 当水位超过 2.30 m 并不断上涨, 管网系统排水能力骤减, 河道水位逐渐成为制约管道过流能力、加重积水程度的主要因素。因此, 建议研究区域河道排涝控制最高水位控制在 2.30~2.32 m 左右。

参考文献:

- [1] 杨开忠, 张永生, 单菁菁, 等. 中国城市发展报告 No. 15[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2022.
- [2] 张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485-491.
- [3] 谢华, 黄介生. 平原河网地区城市二级排涝标准匹配关系[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(5): 39-42, 52.
- [4] 陆敏博, 王欢, 魏清福, 等. 平原河网城市雨水系统排水能力及内涝风险评估浅析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 66-68, 73.
- [5] 汉京超, 俞士静, 陈秀成. 沿海平原河网城市排水防涝典型问题及对策分析[J]. 中国给水排水, 2022, 36(4): 30-34.
- [6] BABAEI S, GHAZAVI R, ERFANIAN M. Urban flood simulation and prioritization of critical urban sub-catchments using SWMM model and PROMETHEE II approach[J]. Physics and chemistry of the earth, parts A/B/C, 2018, 105: 3-11.
- [7] REN X, HONG N, LI L, et al. Effect of infiltration rate changes in urban soils on stormwater runoff process[J]. Geoderma, 2020, 363: 114-158.
- [8] CHANG H K, LIN Y J, LAI J S. Methodology to set trigger levels in an urban drainage flood warning system-an application to Jhonghe, Taiwan [J]. Hydrological sciences journal, 2018, 63(1): 31-49.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 室外排水设计标准: GB50014-2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [10] 中华人民共和国水利部. 治涝标准: SL723-2016[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.

