

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230146

降雨总历时及河流水位对雨水管网排水性能影响的模拟分析

程素华¹, 姜应和^{1,2}, 金建华¹

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 文华学院城市建设工程学部, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为探究河流水位及降雨总历时对雨水管网排水性能的影响, 构建了某园区管网—河流一体化 SWMM 概化模型, 基于设计重现期为 5 年、降雨总历时分别为 2、24 h 的降雨事件, 模拟分析了不同河流初始水位时园区雨水管网和河流的排水工况。结果表明, 当河流初始水位较低, 排水口处于自由出流时, 河流水位对雨水管网的排水性能几乎无影响。排水口淹没出流时, 随着河流初始水位的提升, 排水系统的超载管道比例和溢流节点比例递增, 超载时间和溢流时间延长, 排水口及管道节点峰值流量下降, 且越靠近排水口节点峰值流量下降幅度越大; 基于相同降雨重现期及河流初始水位, 相比于短历时降雨, 长历时降雨的超载管道比例和溢流节点比例较大, 超载时间和溢流时间较长, 排水口及管道节点峰值流量下降幅度较大。在进行河流—管网汇水区雨水排水系统设计时, 宜对雨水排水系统进行历时 24 h 降雨、不同河流水位的排水性能校核。

关键词: 河流水位; 总降雨历时; SWMM; 雨水管网; 排水性能

中图分类号: TU99; TV672⁺. 2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0086-05

1 引言

城市雨水管网设计重现期偏低、不透水率增加、排水口水位过高及河水倒灌等是造成城市内涝的主要原因^[1-2]。河流作为城市排水的重要组成部分, 通常与雨水管网的排水口相连, 水位过高则会影响管网排水。张家立等^[3]通过设置排水口边界水位发现管网排水能力与外河水位和各节点的平均落差显著正相关; 姜容等^[4]将河道纳入雨洪模型中, 发现外河高水位会对管网排水有顶托作用, 排水能力大幅降低。SWMM 模型中河道与管网的关联途径有两种^[5], 第一种通过设置排水口类型, 将河流水位作为排水口边界条件输入, 该方法适用于管网排水量对水位影响较小的河流; 第二种是构建管网—河流一体化模型, 将河流概化为多段明渠, 排水口处设置虚拟管道接入河流节点, 这种方法能更好地反映管网流量与河道水位之间的动态影响。然而现有研究大多采用第一种关联途径, 且一般采用短历时雨型进行模拟。对此, 本文以湖北省公安县某工业园区为例, 构建

园区雨水管网—河流一体化 SWMM 模型, 基于 2 h 短历时和 24 h 长历时雨型, 模拟分析河流水位及降雨总历时对雨水管网排水性能的影响, 以期对管网—河流汇水区的排水规划提供借鉴。

2 管网—河流一体化 SWMM 模型构建

2.1 研究区概化

湖北省公安县杨家厂镇工业园区位于江汉平原南部, 长江中游南岸。园区总汇水面积约 4.53 km², 丹水河南北向贯穿园区, 是该园区的主要排涝通道, 河底宽 20 m, 堤顶标高 35~37 m, 边坡 1:2, 纵坡 1:7 000, 河道过水断面形状近似梯形。园区雨水管网设计重现期为 2 年, 管径介于 DN700~B×H=2.4 m×2.0 m 之间, 管网长约 18.37 km, 共有雨水排放口 11 个, 分布于丹水河两岸。雨水管网概化为节点 137 个、管道 137 段、排水口 11 个(P1~P11); 河流概化为 9 段明渠、9 个节点和 1 个河道下游排水口(P12)。园区雨水排水系统 SWMM 概化模型见图 1。

收稿日期: 2023-02-07, **修回日期:** 2022-03-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资助项目(185206019)

作者简介: 程素华(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为市政给排水技术与应用, E-mail: 1148740158@qq.com

通讯作者: 姜应和(1963-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为市政给排水理论与技术, E-mail: jyhe123@163.com

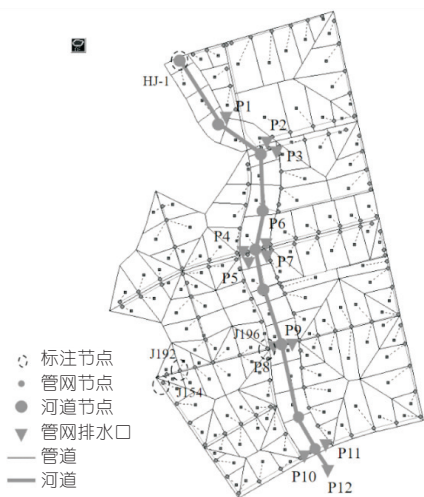


图 1 园区雨水排水系统 SWMM 概化模型

Fig. 1 SWMM generalized model of rainwater drainage system in industrial park

2.2 主要参数设置

根据研究区实际情况,同时参考 SWMM 手册^[6]中的取值范围和相关文献^[7],进行模块选取及基本参数设置,结果见表 1。

表 1 模块选择及参数取值

Tab. 1 Module selection and parameter values

模型参数	取值	模型参数	取值
入渗模块	Horton	透水地表曼宁系数	0.013
汇流模块	非线性水库	河道糙率	0.025
水力模型	动力波	不透水地表注蓄深度	2 mm
最大下渗速率	76.2 mm/h	透水地表注蓄深度	6 mm
最小下渗速率	4 mm/h	地形坡度	1%~3%
不透水地表曼宁系数	0.15		

2.3 河流水位设置

河流初始水位可利用 SWMM 模型中热启动文件进行设置^[8]。通过在启动时刻添加合适的恒定流量,不断调试系统至达到要求并生成热启动文件,之后运行模型时直接加载热启动文件,即可获得稳定的河流初始水位。丹水河上游起始节点 HJ-1 和下游排水口 P12 的底部高程分别为 31.25、30.79 m。为分析不同河流水位时管网的排水能力,以上游河段起始节点的底部高程为基准,通过流量调试,分别模拟生成丹水河 31.25 (自由出流)、32.25、33.25、34.25、34.75 m (接近地面高程)初始水位的热启动文件,同时引入无量纲变量淹没度反映排水口出流状态。淹没度指排水口底部淹没高度与排水口管径(箱涵为涵洞高度)之比^[9],当河流水位超过排水口顶部时,淹没度大于 1,排水口处于淹没出流状态。各设置水位下排水口初始淹没度见表 2。

2.4 降雨条件设置

设计降雨分别采用重现期 $P = 5$ a 的 2 h 短

表 2 不同河流水位各排水口初始淹没度

Tab. 2 Initial submergence of each outlets at different river levels

排水口	不同河流水位下的排水口初始淹没度				
	31.25 m	32.25 m	33.25 m	34.25 m	34.75 m
P1	—	—	—	0.25	0.67
P2	—	—	0.40	1.06	1.39
P3	—	—	0.06	0.77	1.13
P4	—	0.22	0.72	1.22	1.47
P5	—	—	0.52	1.24	1.59
P6	—	—	0.47	1.10	1.41
P7	—	—	0.55	1.18	1.49
P8	—	0.37	0.87	1.37	1.62
P9	—	0.23	0.73	1.23	1.48
P10	—	0.43	0.93	1.43	1.68
P11	—	0.24	0.74	1.24	1.49

注:—表示排水口淹没度 ≤ 0 ,即水位不高于排水口底部高程。

历时及 24 h 长历时雨型。2 h 短历时降雨采用荆州市暴雨强度公式:

$$q = \frac{3\,100.593(1 + 0.932\lg P)}{(t + 16.100)^{0.823}} \quad (1)$$

式中, q 为设计暴雨强度, $L/(s \cdot ha)$; P 为降雨重现期, a ; t 为降雨历时, min 。

应用芝加哥雨型生成 $P = 5$ a、 $t = 2$ h 的降雨过程线。总降雨量为 64.21 mm,退水时间为 3 h,模拟总历时为 5 h,雨峰系数 $r = 0.4$,2 h 降雨设计降雨过程线见图 2。

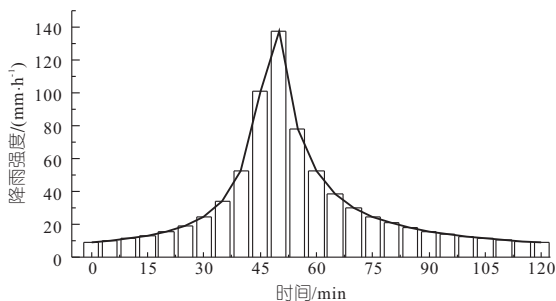


图 2 公安县 2 h 降雨事件设计降雨过程线

Fig. 2 Design rainfall process curve of 2 h rainfall event in Gong'an County

24 h 设计降雨过程线根据 24 h 设计降雨量和 24 h 设计雨型进行绘制。查询《湖北省暴雨参数图集》^[10],当重现期 $P = 5$ a 时,24 h 降雨量为 138.60 mm。由于公安县缺乏 24 h 降雨设计雨型,借用《武汉市暴雨强度公式及设计暴雨雨型》(DB4201/T641-2020)^[11]中 24 h 设计雨型。用公安县的 2 h 模拟雨型替换武汉市 24 h 设计降雨过程线中最大 2 h 雨型,并根据 24 h 总降雨量将剩余降雨量按比例分配至其余 22 h 降雨时段,所生成的公安县 $P = 5$ a 的 24 h 设计降雨过程线见图 3。

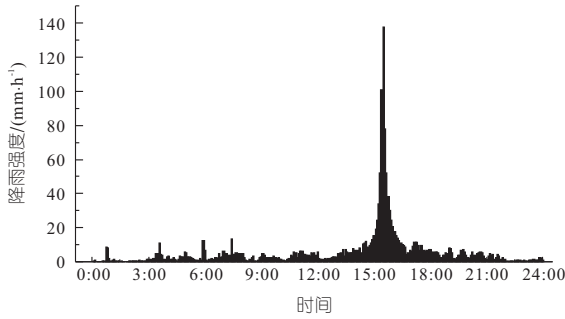


图 3 公安县 24 h 降雨事件设计降雨过程线

Fig. 3 Design rainfall process curve of 24 h rainfall event in Gong'an County

3 模拟结果与分析

3.1 管道超载分析

管道超载模拟分析结果见图 4(图 4 中, t_c 为管道超载时间)。由图 4(a)可知,对于重现期 $P=5$ a 的 2 h 降雨事件,当河流初始水位低于 32.25 m 时,管网各排水口均处于自由出流状态,管道超载数量较少、超载时间均小于 1 h,之所以出现超载是因为模拟降雨的重现期大于设计重现期 2 a。随着河流水位继续提升,各排水口陆续转变为淹没出流,由于水力坡度下降,超载的管道数量显著增加,超载时间延长。初始水位上升至 34.75 m,受河流高水位顶托影响,管道处于持续满流状态^[12],雨水难以及时排出,排水管道超载比例相比自由出流时增加了 56.2%,约 85.4%的管道超载时间超过 3 h,排水系统接近瘫痪。

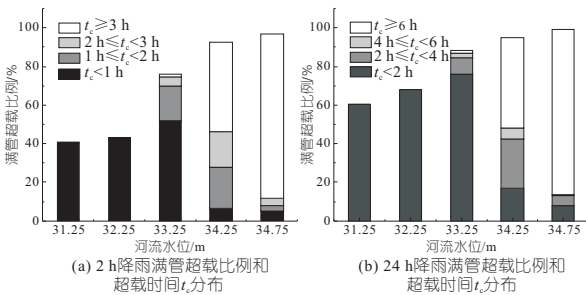


图 4 2、24 h 降雨事件不同河流水位管道超载情况

Fig. 4 Pipe overload of different river levels in 2, 24 h rainfall events

由图 4(b)可知,对于重现期 $P=5$ a 的 24 h 降雨事件,河流初始水位也从 31.25 m 上升至 34.75 m,排水管道超载比例增加了 38.7%。超载时长变化趋势与 2 h 降雨事件基本一致,随着河流初始水位增加,管道超载比例增加、超载时间延长。但相比 2 h 短历时的降雨,相同河流水位条件下,24 h 降雨事件的管道超载比例更大、超载时间更长。因为当降雨强度一定时,随着降雨历时的延长,区域降雨总量增加,雨峰前期降雨历

时较长,使得土壤水分含量上升,下渗能力下降,地表雨水积聚,粗糙度降低,对雨水径流的阻滞、调蓄作用削弱,无法达到很好的削峰效果^[13]。因此,24 h 降雨事件的管道峰值流量大于 2 h 降雨事件,管道超载数量和超载时长较大。

3.2 节点溢流分析

管道超载后,管道的流态由重力流过渡为压力流,检查井处水位高出管顶,若超过地面高程则会产生溢流。园区溢流模拟分析结果见图 5。对于长、短历时两种雨型,河流初始水位超过 32.25 m 后,随着初始水位的提升,节点溢流数量、溢流时间和总溢流量递增,且 2 h 降雨事件 3 项指标的模拟结果均小于 24 h 降雨事件 3 项指标的模拟结果。河流初始水位接近地面后,2、24 h 降雨事件系统溢流节点比例相比自由出流分别增加了 52.5%、36.5%,系统总溢流量分别增加了 3.4×10^4 、 5.0×10^4 m³。

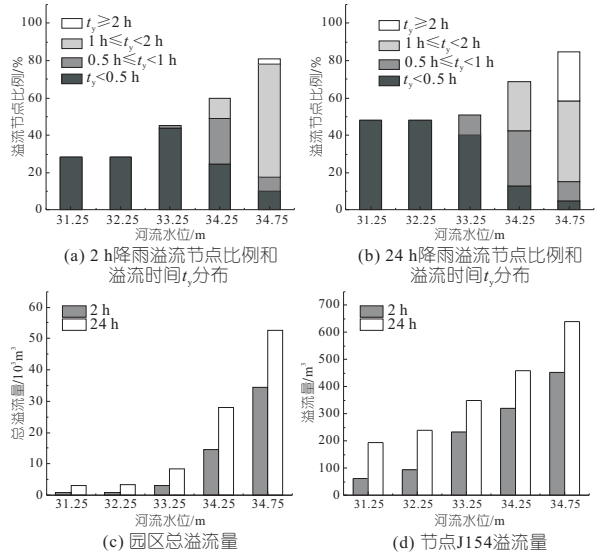


图 5 2、24 h 降雨事件不同河流水位节点溢流情况
Fig. 5 Node overflow of different river levels in 2 h and 24 h rainfall events

取排水口 P10 汇水区上游管道节点 J154 进行模拟分析,结果见图 5(d)。对于长、短历时两种雨型,节点溢流量在河流初始水位较低时均变化不大,初始水位超过 32.25 m 后,节点溢流量增加速度明显加快,与系统总溢流量变化趋势一致。这是因为河流初始水位高于排水口顶部后,会形成河水顶托甚至倒灌,使雨水管道的水力坡度降低,过流能力减弱,造成雨水难以及时排出、节点溢流量剧增。

3.3 排水口峰值流量变化

直接排入丹水河的排水口共有 11 个,P1 排水口由于汇水面积过小,不进行统计分析,各排水口峰值流量模拟分析结果见图 6。对于总历时分

别为 2、24 h 的降雨事件,河流初始水位低于 32.25 m 时,各排水口峰值流量变化均较小。河流初始水位上升至 33.25 m 时,2 h 降雨事件的部分排水口峰值流量不减反增,这是因为该部分排水口自由出流时,上游节点最高水位低于或略高于管顶高程;初始水位增加后,河水倒灌使管道初始充满度增大,雨峰时刻上游节点水位超过管顶后会迅速增加,且增加速度高于河流水位增长速度,水力坡度相比自由出流时短暂增大,因此排水口峰值流量偏高。随着初始水位继续提升,各排水口出流状态转变为淹没出流,高水位顶托使排水口流速减小,峰值流量急剧下降。24 h 降雨事件的总降雨量大、历时长,降雨峰值前大量雨水汇入丹水河,河流水位被抬高,导致排水口淹没度增加,相比于 2 h 降雨事件峰值流量下降幅度较大。

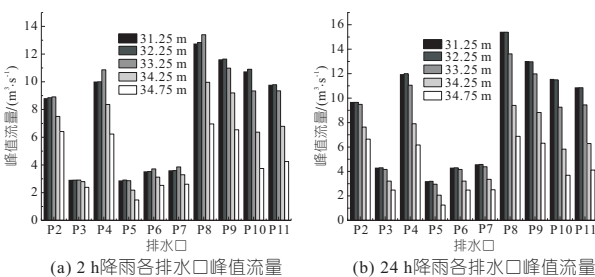


图 6 2、24 h 降雨事件不同河流水位排水口峰值流量
Fig. 6 Peak flow of each outlet with different river levels in 2 h and 24 h rainfall events

各排水口由于节点底部高程差异,受河流初始水位影响程度不同,汇水区的地面平均标高与河流水位落差越大,排水能力受影响越小^[14]。P3、P5、P6、P7 排水口所在汇水区地势较高、管道埋深较浅、节点平均标高与河流水位落差较大,受河流影响的初始水位较高,峰值流量下降幅度较小。其他几个汇水区则反之。

以排水口 P10 为例,不同情境下排水口流量的模拟分析结果见表 3、图 7。对于 2 h 降雨事件,当河流初始水位不大于 32.25 m 时,流量过程线与自由出流基本一致;初始水位为 33.25 m 时,排水口淹没度为 0.93,相比自由出流峰值流量下降了 8.7%,虽然排水口起初未被完全淹没,但前期雨水汇入会抬高河流水位,雨峰时刻排水

表 3 不同河流水位排水口 P10 峰值流量

Tab. 3 Peak flow of P10 outlet in different river levels

降雨 历时 /h	不同河流初始水位(初始淹没度)排水口峰值流量 /(m ³ ·s ⁻¹)				
	31.25 m (0.00)	32.25 m (0.43)	33.25 m (0.93)	34.25 m (1.43)	34.75 m (1.68)
2	10.73	10.90	9.34	6.37	3.74
24	11.55	11.50	9.26	5.82	3.69

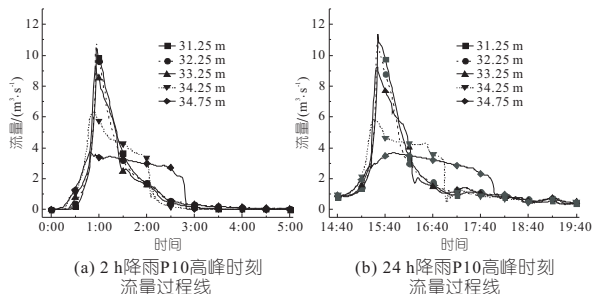


图 7 2、24 h 降雨事件不同河流水位 P10 流量过程线
Fig. 7 P10 flow process curves of different river levels in 2 h and 24 h rainfall events

口处于淹没出流状态,致使峰值流量下降;河流初始水位分别为 34.25、34.75 m 时,排水口处于完全淹没状态,峰值流量分别下降了 40.7%、65.1%,雨水难以及时排出并积聚于节点处,待河流水位下降排水能力恢复后排出,高峰排水时间延长^[15]。对于 24 h 降雨事件,排水口自由出流时,由于地表径流量和管道流量较大,排水口峰值流量高于 2 h 降雨事件;排水口淹没出流后,动态顶托效果更为明显,河流初始水位分别为 34.25、34.75 m 时,排水口峰值流量分别下降了 49.6%、68.1%,高峰排水延续时间也较长。

3.4 连续管道上下游节点流量变化

选取河段中游的一段连续管道的几个节点(J192~J196),各节点流量变化的模拟结果见图 8。对于 2 h 降雨事件,各节点峰值流量随河流水位增加整体呈先平稳后下降的趋势。河流初始水位为 34.75 m 时,上游节点 J192 管道埋深较浅,节点底部较高,受河流水位影响较小,峰值流量下降 35.9%;下游节点 J196 靠近排水口,管道埋深较大,水位顶托影响明显,峰值流量下降了 45.2%。对于 24 h 降雨事件,各节点峰值流量随水位增加的变化趋势及上下游节点峰值流量下降幅度的差异与 2 h 降雨事件一致,但初始水位相同时节点峰值流量下降幅度大于 2 h 降雨事件,河流初始水位为 34.75 m 时,节点 J192、J196 峰值流量分别下降了 40.1%、54.6%。

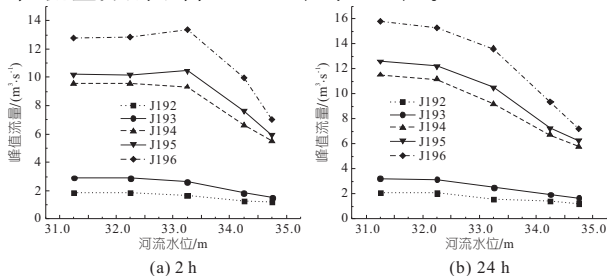


图 8 2、24 h 降雨事件不同河流水位连续管道节点峰值流量变化

Fig. 8 Peak flow changes of continuous pipeline nodes with different river levels in 2 h and 24 h rainfall events

4 结 论

a. 当河流初始水位较低,排水口处于自由出流时,河流水位对雨水管网排水性能的影响甚微。当排水口处于淹没状态,随着河流初始水位的提升,水位顶托使得排水系统的超载管道比例和溢流节点比例增加,超载时间和溢流时间延长,排水口及管道节点峰值流量下降,且越靠近排水口的节点峰值流量下降幅度越大。

b. 基于相同降雨重现期及河流初始水位,相比于短历时降雨,长历时降雨事件雨峰前期雨水使得土壤含水率提高,导致雨峰时刻的地表径流量较大,因此超载管道比例和溢流节点比例较大,超载时间和溢流时间较长,排水口及管道节点峰值流量下降幅度较大。因此,为安全起见,对于规划设计的雨水排除系统的排水性能宜进行 24 h 降雨事件模拟校核。

参 考 文 献:

[1] KONG FENG, SUN SHAO, LEI TIANJIE. Understanding China's urban rainstorm waterlogging and its potential governance[J]. *Water*, 2021, 13 (891): 891.

[2] 汪晖. 武汉城市内涝问题研究及探讨[J]. *给水排水*, 2017, 43(增刊): 117-119.

[3] 张家立,丁华凯,高成,等. 外河水位顶托下雨水管网排水能力变化的 SWMM 模拟[J]. *水资源与水工*

程学报, 2017, 28(6): 44-49,55.

[4] 姜容,邵银霞,李光焱. 外河对城市排水管网影响的数值模拟研究[J]. *水力发电*, 2017, 43(10): 94-98.

[5] 资强,屈振宇,杨仲韬,等. 耦合市政排水管网的城区河道洪水过程模拟[J]. *水利规划与设计*, 2019(11): 54-57.

[6] ROSSMAN L A. 雨水管理模型参考手册第 I 卷—水文学[M]. 李树平,译. 2016.

[7] 金建华,徐振韬,金溪,等. 基于 SWMM 的天门北城区排水系统削峰及控污模拟分析[J]. *给水排水*, 2018,44(5):121-126.

[8] 安志鹏. 城市暴雨径流控制与河道排蓄优化调控方法的研究[D]. 天津:天津大学, 2014.

[9] 罗鸣,叶兴成,王以超,等. 河道边界水位对管道排水能力的影响分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 169-174.

[10] 湖北暴雨统计参数图集[M/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/e2bfc01eed630b1c59eeb58d.html>.

[11] 武汉市市场监督管理局. 武汉市暴雨强度公式及设计雨型:DB4201/T641-2020[S].

[12] 陆露,赵冬泉,陈小龙,等. 城市排水管网与内部河道耦合模拟研究[J]. *给水排水*, 2014, 40(10): 103-107.

[13] 燕超,胡海波,徐晓梅,等. 模拟降雨条件下城市下垫面径流系数变化规律[J]. *中国水土保持科学*, 2022, 20(5): 24-30.

[14] 张兆祥,杨帆,王大春. 淹没出流雨水管道应对内涝设计探讨[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(1): 83-85,89.

[15] 苗小波,吕谋,梁风超,等. 潮水顶托对雨水管网的影响分析[J]. *水电能源科学*, 2018, 36(6): 84-87.

Impact Simulation Analysis of Total Rainfall Duration and River Level on Drainage Performance of Rainwater Pipe Network

CHENG Su-hua¹, JIANG Ying-he^{1,2}, JIN Jian-hua¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Department of Urban Construction Engineering, Wenhua College, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to explore the impact of river level and total rainfall duration on the drainage performance of rainwater pipe network, an integrated SWMM generalized model of pipe network and river in a certain industrial park was constructed. Based on the rainfall events with a return period of 5 years and the total rainfall duration of 2 h and 24 h, the drainage conditions of rainwater pipe network and river in industrial parks with different initial river levels were simulated and analyzed. The results show that when the initial river level is low and the outlet is free outflow, river level has little impact on the drainage performance of the rainwater pipe network. When the outlet is submerged, with the increase of the initial river level, the proportion of overloaded pipelines and overflow nodes in the drainage system increases, the overload time and overflow time are prolonged, the peak flow of outlets and pipeline nodes decreases, and the peak flow of node which is closer to outlet decreases more sharply. Based on the same rainfall return period and the initial river level, compared with the short duration rainfall, the proportion of overloaded pipelines and overflow nodes in the long-duration rainfall is larger, the overload time and overflow time are longer, and the peak flow of outlets and pipeline nodes decreases greatly. When designing the storm water drainage system with river-pipe network, it is advisable to check the drainage performance of storm water drainage system for 24 h rainfall and different river levels.

Key words: river level; total rainfall duration; SWMM; rainwater pipe network; drainage performance