

# 外河水位顶托下雨水管网排水能力变化的SWMM模拟

张家立<sup>1</sup>, 丁华凯<sup>2</sup>, 高成<sup>1</sup>, 赵勇<sup>3</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 华东勘测设计研究院有限公司, 浙江杭州 311122; 3. 江苏省水利厅工程管理处, 江苏南京 210029)

**摘要:**以沈阳市和平区雨水管网系统为例,选取芝加哥雨型为设计雨型,利用SWMM,模拟分析了不同暴雨重现期和外河设计洪水位下的雨水管网系统排涝过程。结果表明:随着降雨重现期增大,雨水管网排水能力增加,但积水程度加重;雨水管网系统有效排涝系数随着降雨重现期的增大而减小,且在高重现期时变化程度减缓;雨水管网系统总排水能力与外河水位和各节点(雨水井)的平均落差呈显著正相关,相关系数 $R$ 为0.992,并呈近似线性关系;泵站排水在淹没出流地区至关重要,本例中可提升36.3%的管网系统排水能力,而对于自由出流地区,泵站对系统排水能力基本没有贡献。

**关键词:**雨水管网; SWMM; 排水能力; 外河水位顶托; 内涝

中图分类号: S276.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0044-06

## Simulation of changes of drainage capacity of rainwater pipe network caused by the jacking of outer rivers

ZHANG Jiali<sup>1</sup>, DING Huakai<sup>2</sup>, GAO Cheng<sup>1</sup>, ZHAO Yong<sup>3</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 3. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Taking the rainwater pipe network system of Heping District in Shenyang as an example, the Chicago rain type is selected as the design rain type, and the SWMM is used to simulate the drainage process of the storm water pipe network system under different heavy rainfall recurrence periods and out-river design flood levels. The results show that with the increase of rainfall recurrence period, the drainage capacity of rainwater pipe network increases, but the degree of waterlogging increases. The effective drainage coefficient of rainwater pipe network system decreases with the increase of rainfall recurrence period and the degree of change slowed down at high recurrence period. There is a significant positive correlation between the total drainage capacity of the network system and the difference between the river water level and the average ground elevation of manholes and the correlation coefficient  $R$  is 0.992, and it shows an approximate linear relationship. Pumps are essential in districts where submerged discharge occurs potentially. In this case, the pump enhances the drainage capacity of the pipe network system by 36.3%, while for the free flow area, the pumping station may not contribute to the drainage capacity of the system basically.

**Key words:** rainwater pipe network; SWMM; drainage capacity; jacking of outer river; waterlogging

近年来,城市道路硬化率逐渐提高,不透水面积增加,径流系数增大,城市内涝现象严重,造成重大损失。局部短时降雨过多、复杂的城市下垫面条件

引起的暴雨径流产汇流过程、市政管网水流运动过程的改变是城市暴雨内涝发生的内在动力因素,也为认识和模拟城市内涝增加了难度<sup>[1-2]</sup>。传统的模

收稿日期:2017-07-19; 修回日期:2017-08-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41301016);中央高校基本科研业务费项目(2014B16814);长江水利委员会长江科学院开放研究基金项目(CKWV2015206/KY)

作者简介:张家立(1993-),女,江苏苏州人,硕士研究生,主要从事城市防洪排涝研究。

通讯作者:高成(1983-),男,安徽宿州人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事城市防洪排涝及低影响开发等研究。

拟及预测分析城市雨洪的方法有等流时线法、单位线法等,此类方法的缺点在于要求水文资料充足、适用于汇流面积较小的区域,而且无法模拟流量过程和城市管网系统<sup>[3]</sup>。SWMM(Storm Water Management Model)可模拟城市降雨径流和城市排水管网系统,符合城市产汇流规律<sup>[4]</sup>。近年来,SWMM模型在国内外均得到广泛应用,在城市排水、环境整治等工程实践中发挥作用,并不断被加以完善<sup>[5-8]</sup>。

城市洪水研究一般认为洪涝严重程度与下垫面不透水率或者土地利用类型密切相关,相对而言,较少关注到城市排水网络对水文响应的影响<sup>[1,9-10]</sup>。城市排水网络包括城市雨水管网系统、天然河网、泵站闸站等。雨水管网系统是城市排水网络的重要组成部分,其排水能力直接影响了市政排水和防涝能力。雨水管网系统的排水能力受多种因素影响,已有研究大多集中在建模模拟暴雨重现期、管网布置形式、管道坡度、管径、管道断面形式对管网系统排水能力的影响,探讨管网系统中易引发内涝的问题管道,关于城市雨水管网排水能力对河道水位的响应研究较少<sup>[11-13]</sup>。张兆祥等<sup>[14]</sup>通过SWMM建模,得出结论:淹没出流时增大雨水管道管径可有效应对城市内涝;钱海平等<sup>[15]</sup>应用Infoworks ICM研究了管道逆坡、淤积对管道排水能力的影响,认为管道淤积相比于逆坡对管网排水能力的危害更大,在淹没出流时增大管径基本不会对排水能力产生影响。

实际中雨水管网系统的排水口通常连接于江河,河道水位对其排水能力的影响不容忽视。在下游排水口高程高于外河水位时,为重力排水口,处于自由出流状态,下游洪水无顶托作用,反之在外河水位高于排水口高程时,重力排水口发生淹没出流。完全依靠自流排水的平原城市雨水系统往往按照非淹没出流设计,但由于地形限制及造价考虑,排水管道出水口底高多接近于河道底部高程,实际出流方式为淹没出流,汛期受河道水体顶托而排水不畅,致使相应城市雨水管网系统中低洼路段积水严重,涝水排除时间较长,这也是多数城市汛期发生严重内涝问题的重要原因<sup>[16]</sup>。排水管网中水流运动复杂,存在河道水位的顶托与各管道的水流相互干扰,河道水位变化制约着排水管网,只有它们协调畅通,排水系统的应有功能才能得到充分发挥<sup>[17]</sup>。

综上,已有研究对于河道水位、泵站等城市雨水管网排水能力影响因素关注较少。因此,为明确外河水位对管网系统特别是有泵站和重力排水口管网系统排水能力的影响,本文以沈阳市和平区某雨水

管网系统为例,应用SWMM建模,分析不同暴雨重现期及外河水位对管网系统排涝能力的影响,以及泵站排水口对重力排水口排水能力的补偿作用,为类似地区市政雨水管网系统的规划和新建、改建、扩建等工程提供依据。

## 1 SWMM 模型构建

SWMM(暴雨雨水管理模型)于1971年由美国环保局提出,是降雨径流量和水质分析的综合性计算机模型,它面向城市区域,用于模拟汇水区域、检查井、管道等水文、水力和水质要素的时空分布<sup>[18]</sup>。SWMM可用于模拟城市排水管网系统,其模拟流程包括:子流域概化、地表产流计算、地表汇流演算、管网汇流子系统演算。其径流模块综合处理各子流域所发生的降水、径流和污染负荷。其汇流模块则通过管网、渠道、蓄水和处理设施、水泵、调节闸等进行水量传输模拟。

### 1.1 排水管网系统概化

沈阳市位于辽宁省辽河平原中部,呈东北高,西南低之地势,属温带季风型大陆性气候,冬季严寒干燥,夏季湿热多雨。多年平均降水量680.4 mm,年内降水分配不均,7、8两月降水量占全年降水量的47%左右。

本次研究选取沈阳市和平区的一个雨水管网系统作为研究区域,总排水面积为16.6 km<sup>2</sup>,共364个子汇水区,363个节点,390条管道和1个泵站。SWMM中提供了5种水泵以及4种类型的水泵曲线供选择<sup>[19]</sup>,其中理想水泵不需要水泵曲线(其流量等于入流量,仅用于初步设计)。4种水泵曲线分别是Type1、Type2、Type3、Type4。本例中水泵设计流量为8 m<sup>3</sup>/s,在SWMM模型中概化成Type4型水泵,水泵流量随上一个节点水深变化而变化。泵站开启深度为2 m,当水深降至1 m时关闭。

研究区域共有2个排水口,雨水经管网汇流入排水口,再排至浑河。下游处为排水口A,为重力排水口,在遭遇浑河高水位顶托时,容易造成排水能力下降;上游处为排水口B,为泵站排水口,涝水通过泵站提升抽排至浑河。这两个排水口所处的排水系统相互连通,具有排水能力相互补充作用。排水管网、泵站、排水口构成一个独立的城市雨水管网系统,研究区排水管网系统概化图见图1。

### 1.2 子汇水区划分及模型参数设置

模型参数设置主要参考SWMM模型用户手册的建议,根据已有经验值和2011年沈阳市实测某一场次

降雨和积水情况来调整参数。采用非线性水库模型来模拟汇流过程,其中地表坡面根据实际地形取值。不透水区洼地蓄水深度取 2.5 mm,透水区洼地蓄水深度取 6.5 mm。根据研究区域实际下垫面情况,不透水地面曼宁系数取 0.015,透水地面曼宁系数取 0.2,管道粗糙系数取 0.013。根据地形资料,按照坡度定汇流方向<sup>[20]</sup>。计算时间步长为 5 min。

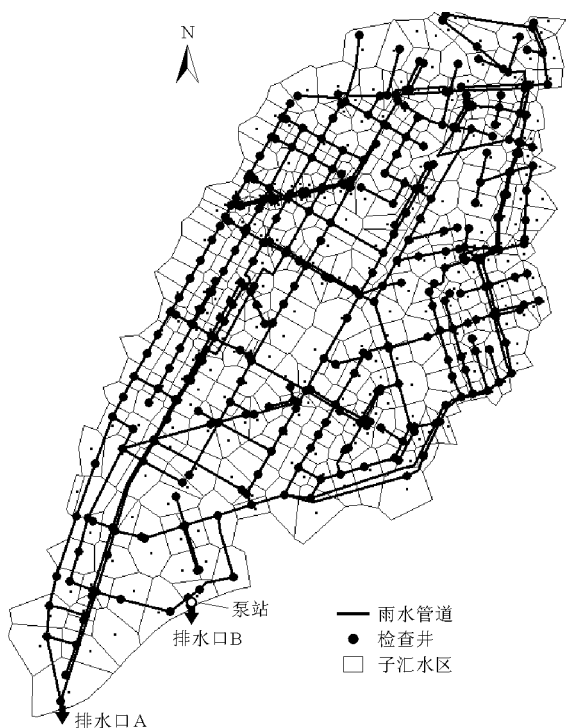


图1 研究区排水管网系统概化图

### 1.3 边界条件

**1.3.1 暴雨** 在城市排水管网研究设计中,雨水管渠的设计流量主要取决于该区域的降雨强度<sup>[21]</sup>。在城市排水系统模型中,选用的暴雨边界条件是能否反映真实的降雨过程和提高模型模拟精度的重要因素之一。降雨分布规律随着地区气候不同产生差异,要得到一个地区的降雨分布规律适合的降雨过程线,需要进行大量的统计分析计算。目前常用的雨型有 Huff 雨型、Yen 和 Chow 雨型(三角形雨型)、SCS 雨型、Keifer 和 Chu 雨型(芝加哥雨型)、Pilgrim 和 Cordery 雨型<sup>[22]</sup>。Keifer 和 Chu 法的洪峰不受历时影响,一次确定的降雨过程在各段管道计算时均适用,且雨强过程可用当地的暴雨公式来确定,雨峰相对位置  $r$  值统计也较方便,且各地的变化不大,一般在 0.4 左右,在缺乏当地资料时可用 0.4 的近似值。岑国平等人在经过大量模拟和比较后,认为 Keifer 和 Chu 雨型(芝加哥雨型)效果较好,一般能

够满足精度要求,在国内外应用广泛,建议采用该雨型为设计雨型<sup>[23]</sup>。

根据《室外排水设计规范》(GB 50014-2006, 2014 年版),特大城市中心城区雨水管渠设计重现期选取 3~5 a 一遇,非中心城区选取 2~3 a 一遇<sup>[24]</sup>。采用沈阳市暴雨公式计算 1 h 短历时 1、2、5、10、50 a 一遇设计暴雨。根据芝加哥降雨过程线进行雨程分配。沈阳市暴雨强度公式见式(1),各重现期 1 h 降雨过程线见图 2。

$$q = \frac{1825(1 + 0.774 \lg P)}{(t + 8)^{0.724}} \quad (1)$$

式中:  $q$  为设计降雨强度,  $L/(hm^2 \cdot s)$ ;  $t$  为降雨历时, min;  $P$  为设计降雨重现期。

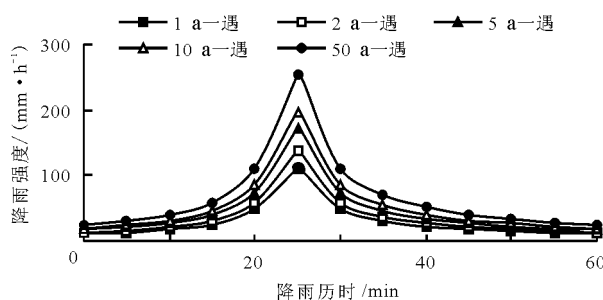


图2 各重现期 1h 降雨过程线

在下边界自由出流情况下,暴雨分别采用 1、2、5、10、50 a 一遇设计暴雨过程,以此分析不同重现期暴雨的管道排水能力。考虑到沈阳市中心城区的重要性,在相同重现期暴雨下,分析不同下边界水位过程下的管道排水能力时,暴雨选择 5 a 一遇设计暴雨过程。将模拟得出的降雨过程输入初始的 SWMM 模型里,其次入渗模型采用霍顿模型,管网汇流模型采用动力波法模拟。

**1.3.2 外河水位边界** 排水口 A 底高 33.6 m, 低于 50 a 一遇设计洪水位 39.39 m, 排水口 B 底高 35 m, 低于 50 a 一遇设计洪水位 40.09 m。在设置外河水位边界时,可采用常水位 5、10、20 和 50 a 一遇设计浑河水位。各重现期 A、B 出水口设计洪水位见表 1。由于市政管道设计中,管道排水口高程多在常水位以上,因此常水位下即为排水口自由出流过程,其排水能力应是管道最大排水能力。

表1 各重现期 A、B 出水口设计洪水位 m

| 重现期 $T/a$ | 排水口 A | 排水口 B |
|-----------|-------|-------|
| 50        | 39.39 | 40.09 |
| 20        | 39.15 | 39.82 |
| 10        | 38.65 | 39.28 |
| 5         | 37.81 | 38.38 |

2 模拟结果及分析

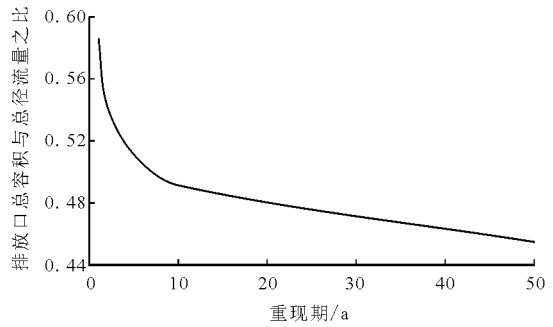
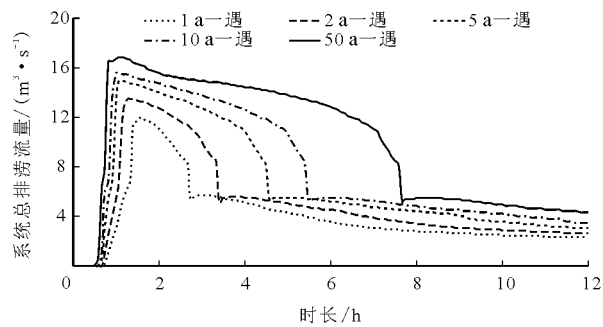
模拟结果输出为每 5 min 一次,总模拟时间为 12 h。SWMM 结果报告中包含研究区各个子汇水区总入渗量、地表径流量以及径流系数等。

2.1 自由出流时各暴雨重现期下管网系统排涝能力比较

在 A、B 出口均为自由出流条件下,分别模拟降雨为 1、2、5、10、50 a 一遇情形时的排水管网系统排涝情况,对管道超载时间、系统总排涝流量(A、B 排水口流量之和)、总径流量进行统计分析,得到管道超载时间分布区间见表 2,系统自由出流时排涝流量、排放口总容积与总径流量之比变化见图 3。本

模型中总径流量一部分进入雨水管网,通过排水系统经由出水口 A 和 B 排出,一部分积于管网系统内部,剩余的部分从较低洼处的节点(雨水井)溢出地面,形成路面积水。管道满流状态持续的时间即为管道超载时间。若管道超载时间较长,则更多的水流从雨水井溢出造成地面积水。

| 表 2 管道超载时间分布区间表 |         |                |                 |          | h |
|-----------------|---------|----------------|-----------------|----------|---|
| $T/a$           | $t = 0$ | $0 < t \leq 5$ | $5 < t \leq 10$ | $t > 10$ |   |
| 1               | 103     | 136            | 27              | 124      |   |
| 2               | 69      | 131            | 37              | 153      |   |
| 5               | 44      | 135            | 35              | 176      |   |
| 10              | 29      | 133            | 31              | 197      |   |
| 50              | 11      | 113            | 40              | 226      |   |



(a) 各降雨重现期下排放口总流量 (b) 排放口总流量与总径流量之比随降雨量重现期变化曲线

图 3 系统自由出流时排涝流量、排放口总容积与总径流量之比变化

由表 2 可知,随着降雨重现期增大,未发生超载的管道数量减少,超载时间较长( $t > 10$  h)的管道数量增加。 $T = 1$  a 时,有 31.8% 的管道超载时间较长,当  $T = 10$  a 时,超载时间较长的管道所占比例升至 50.5%。由此可见,随着降雨重现期的增大,降雨径流对管网造成的负荷加重,地面积水程度加重。分析图 3(a) 可知,随着降雨重现期增大,系统出口排涝流量峰值增加,排水能力增加,50 a 一遇降雨时系统总排涝流量相比于 1 a 一遇时增加 40.9%。综上不难发现,排水能力的增加并不意味着积水程度的减轻。图 3(b) 中模拟时段内排放口总容积与总径流量之比(暂将其称为排水管网系统有效排涝系数)随着降雨重现期的增大而减小,且在低重现期时变化曲线斜率较大,变化较显著,高重现期时曲线变缓。

究其原因,随着降雨重现期增大,该管网系统的排水能力增加的程度不足以匹配降雨量、雨强增大的程度,即排水能力增加相比于涝水量增加有限,系统无法及时排出涝水,超载的管道数量增多,管道超载时间变长,管网负荷加重,更多的水流从雨水井溢

出造成更为严重的地面积水,有效排涝系数减小。且降雨高重现期相比于降雨低重现期,总径流量增加程度加剧,而管网系统排放总容积的增加程度也加剧,从而后者与前者的比值变化程度减缓。

2.2 5 a 一遇暴雨时不同外河水位对系统排水能力影响(淹没出流、泵站正常工作)

沈阳市为全国特大城市,根据《室外排水设计规范》<sup>[6]</sup>,雨水管渠设计重现期为 5 ~ 10 a 一遇,内涝防治设计重现期为 50 ~ 100 a 一遇。因此选取 5 a 一遇暴雨遭遇 50 a 一遇浑河水位进行组合分析。根据《室外排水设计规范》,地面积水设计标准为居民住宅和工商业建筑物的底层不进水、道路中一条车道的积水深度不超过 15 cm。根据节点最大深度和积水最大深度可以得出路面积水深度,统计路面积水深度超过 15 cm 的节点数,见表 3。

由表 3 可知,当排水口 A、B 均遭遇 50 a 一遇外河水位时,发生淹没出流,溢流节点数和积水节点数、总溢流量也增大,服务面积增大 20.8%,总溢流量增大 9.5%。这表明,在降雨重现期、管网结构等因素均不变情况下,外河高水位顶托时,城市积

水情况加重。

表 3  $T=5\text{ a}$  时分别在自由出流及遭遇 50 a 一遇浑河水位时积水情况

| 外河水位<br>边界条件 | 溢流<br>节点数 | 积水<br>节点数 | 总溢流水<br>量/ $10^4\text{ m}^3$ | 溢流点服<br>务面积/ $\text{hm}^2$ |
|--------------|-----------|-----------|------------------------------|----------------------------|
| 自由出流         | 226       | 96        | 28.331                       | 99.68                      |
| 50 a 一遇水位    | 241       | 129       | 31.022                       | 120.39                     |

分别模拟外河水位 5、10、20、50 a 一遇及自由出流时管网系统排涝情况,并统计不同外河水位下 A、B 口排涝流量,计算出系统总排涝流量(见表 4)。“A 口排水能力”即出水口 A 最大出流量。“系统总

排水能力”即 A、B 出水口出流量之和的峰值。上述排水能力均为管网系统在某一场次设计降雨下,排水过程中排水流量的峰值,为实际排水能力。在系统达到系统总排水能力时,出水口 A 的出流量即为“系统达到总排水能力时 A 口流量”,出水口 B 的出流量即为“系统达到总排水能力时 B 口流量”。“变化率”为受 50 a 一遇外河水位顶托情况下的排水流量相比于自由出流时的变化程度,负值表示减小,正值表示增大。出水口 B 为泵站排水口,与泵站直接相连,泵站抽排涝水的出流口即为出水口 B,出水口 B 的流量曲线与泵站工作时的流量曲线是完全一致的,因此 B 口流量可以直接反映泵站的工作情况。

表 4 5 a 一遇暴雨遭遇不同重现期外河水位时排水能力变化  $\text{m}^3/\text{s}$

| 排水能力             | 外河浑河水位的不同重现期 |         |         |        |           |         |
|------------------|--------------|---------|---------|--------|-----------|---------|
|                  | 50 a 一遇      | 20 a 一遇 | 10 a 一遇 | 5 a 一遇 | 常水位(自由出流) | 变化率/%   |
| A 口排水能力          | 0.00         | 0.49    | 2.34    | 4.27   | 8.82      | -100.00 |
| 系统总排水能力          | 7.66         | 8.01    | 9.67    | 11.26  | 14.9      | -48.59  |
| 系统达到总排水能力时 A 口流量 | 0.00         | 0.49    | 2.33    | 4.26   | 8.78      | -100.00 |
| 系统达到总排水能力时 B 口流量 | 7.66         | 7.61    | 7.34    | 7.00   | 6.12      | 25.16   |

分析表 4 可知,随着外河水位增高,出水口 A 的排水能力降低,在 50 a 一遇浑河水位顶托时降为 0,相对自由出流,变化幅度为 100%,此时出水口 A 丧失排水能力。系统总排水能力同样随着外河水位的增加而降低,但相比于自由出流变化幅度约为 49%,小于出水口 A 的变化幅度。

分析系统达到总排水能力时的 A、B 口流量可知,泵站排水口 B 随着外河水位的增高,流量也增大,在 5 a 一遇浑河水位顶托时,排水口 B 排涝流量相比于自由出流时增大约 25%,此时排水口 B 独立承担了整个管网系统排除涝水至外河的功能,这得益于泵站发挥的明显作用。

研究区各节点(雨水井)平均地面高程为 42.498 m,计算平均节点地面高程与外河水位的落差(以下简称落差),研究其与排水能力变化的关

系,见图 4。由图 4 可知,A 口排水能力与系统总排水能力均随落差增大而提高,B 口排水能力随落差增大而降低,这是由于外河水位越高,即落差越小,顶托越明显,此时泵站发挥作用越大,从而泵站排水口 B 排水能力越大。排水口 A、B 及系统总排水能力与落差的关系曲线均近似线性,相关系数  $R$  均达 0.99 以上,其中系统总排水能力与落差的相关系数  $R$  为 0.992。这说明,本例中城市管网排水系统的实际排水能力与外河水位和各节点的平均落差显著相关,并呈现近似线性关系。

### 2.3 50 a 一遇暴雨时不同出流条件下有无泵站对系统排水能力的影响

本例中泵站设计排涝流量为  $8\text{ m}^3/\text{s}$ 。分别模拟管网系统在自由出流、淹没出流(遭遇 50 a 一遇外河水位)时,有无泵站对系统排水能力的影响,见图 5。

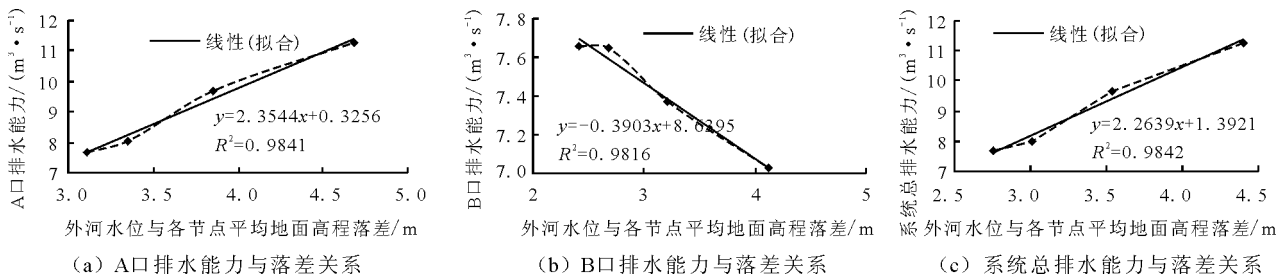
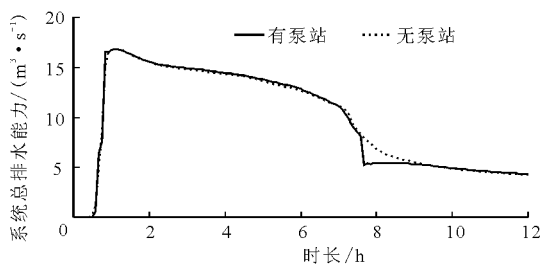


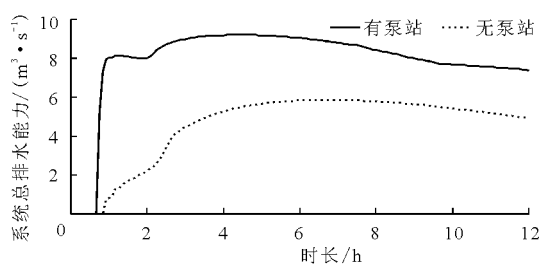
图 4 排水能力与节点平均地面高程和外河水位落差关系

由图5可知,自由出流时,泵站正常工作和没有泵站时的排水流量曲线基本重合,泵站的存在基本对系统实际排水能力没有影响;淹没出流时,若管网系统无泵站,排水能力明显减弱,其峰值降低幅度为

36.3%。这说明,对于发生淹没出流的区域,泵站对于管网系统排水能力的实际发挥是至关重要的,而在自由出流区域,泵站的存在是不必要的,对系统排水能力基本没有贡献。



(a) 自由出流时有无泵站对系统总排水能力的影响



(b) 淹没出流时有无泵站对系统总排水能力的影响

图5 自由出流、淹没出流(遭遇50 a一遇外河水位)时泵站对系统排水能力的影响

### 3 结 论

本文以沈阳市和平区的一个雨水管网系统为例,探讨了不同暴雨重现期和外河水位对城市雨水管网系统排水能力的影响,得出结论如下:

(1)对不同暴雨重现期在自由出流情况下管网系统排涝情况的模拟表明:将排放口总容积与总径流量之比称为雨水管网系统有效排涝系数,该系数随着降雨重现期的增大而减小,且在高重现期时变化程度减缓;排水能力的增加并不代表积水程度减轻,本例中随着降雨重现期的增加,雨水管网系统排水能力增加,积水程度加重。

(2)在5 a一遇暴雨条件下,对不同外河水位下的雨水管网系统排涝情况进行模拟,结果表明:当外河水位增高至排水口底部高程时,开始发生淹没出流,此后随着外河水位的增加,积水情况加重。在此过程中,泵站出水口B排水能力增加,补偿了重力出水口A显著减小的排涝流量,使得系统总排水能力不至于降低为0;本例中城市雨水管网的系统总排水能力、外河水位和各节点(雨水井)的平均落差呈显著正相关,相关系数 $R$ 为0.992。对此需要更详尽的资料和深入研究,得出可使对应区域雨水管网系统充分发挥设计排水能力的最佳水位。

(3)分别模拟管网系统在自由出流、淹没出流(遭遇50 a一遇外河水位)时,有无泵站对系统排水能力的影响,得出结论:相比于无泵站情况,泵站的存在使管网系统的最大排水能力提升了36.3%。在可能发生淹没出流的地区,在出水口前设置提升泵站可有效减小外河水位顶托对排水的危害。

### 参考文献:

- [1] 刘金星,邵卫云. 城市区域雨水地面径流模拟方法探讨[J]. 水利学报, 2006, 37(2):184-188.
- [2] 贾绍凤. 我国城市雨洪管理近期应以防涝达标为重点[J]. 水资源保护, 2017, 33(2):13-15.
- [3] Sharifan R A, Roshan A, Aflaton M, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of SWMM model in computation of manhole water depth and subcatchment peak flood[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2010, 2(6):7739-7740.
- [4] 芮孝芳,蒋成煜,陈清锦,等. SWMM模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进步, 2015, 35(4):1-5.
- [5] 胡伟贤,何文华,黄国如,等. 城市雨洪模拟技术研究进展[J]. 水科学进展, 2010, 21(1):137-144.
- [6] Cristina M, Paule - Mercado A, Lee C H. Calibration of the SWMM for a mixed land use catchment in Yongin, South Korea[J]. Desalination & Water Treatment, 2017, 63:381-388.
- [7] Rai P K, Chahar B R, Dhanya C T. GIS - based SWMM model for simulating the catchment response to flood events[J]. Hydrology Research, 2017, 48(2):384-394.
- [8] Wałęga A, Kaczor G, Stepkowski B. The Role of Local Precipitation Models in Designing Rainwater Drainage Systems in Urban Areas: a Case Study in Krakow, Poland[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2016, 25(5):2139-2149.
- [9] Meierdiercks K L, Smith J A, Baeck M L, et al. Analysis of urban drainage network structure and its impact on hydrologic response[J]. Journal of The American Water Resources Association, 2010, 46(5):932-943.

(下转第55页)

- 55(3):309-317.
- [14] 法尔科内. 分形几何数学基础及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.
- [15] 顾维慧,吴洪军,乔晓波. R/S分析法在涟水县降水趋势预测中的应用[J]. 农业与技术,2013,33(10):204-206.
- [16] 何毅,杨太保,杜鹃,等. 基于GIS和RS的中亚阿拉套山脉近22a来冰川变化[J]. 水土保持研究,2013,20(6):130-134.
- [17] 胡小梅,贺天忠,陈湘海,等. 高关水库降雨序列R/S分析[J]. 水电与新能源,2014(1):53-55.
- [18] 张涵丹,卫伟,薛蕊. 基于R/S分析和Mann-Kendall检验的定西市气温降水变化特征[J]. 水土保持研究,2015,22(6):183-189.
- [19] 唐共地,包赢. 基于有序聚类分析法和Mann-Kendall法的水沙系列突变点研究[J]. 江淮水利科技,2015,(6):35-37.
- [20] 曹宇峰,刘高峰,王慧敏. 基于Mann-Kendall方法的淮河流域降雨量趋势特征研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),2014,37(5):477-480+485.
- [21] 王乐,刘德地,李天元,等. 基于多变量M-K检验的北江流域降雨趋势分析[J]. 水文,2015,35(4):85-90.
- [22] 于芷婧,郝颖坤. 沱江上游径流周期性与季节影响分析[J]. 长江科学院院报,2012,29(9):5-8+13.
- [23] 郭高轩,辛宝东,朱琳,等. 基于小波变换的北京地区1724~2009年降水量多尺度分析[J]. 水文,2012,32(3):29-33.
- [24] 祁顺杰,陈皓锐. Morlet小波在降雨的多时间尺度分析中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(3):79-82.
- [25] 李丹,郭亚萍,焦裕飞,等. 泗河流域径流特征与演变规律研究[J]. 中国农村水利水电,2016(10):91-94.
- [26] 张萍,秦天玲,冯倩,等. 基于小波分析的宜昌水文站径流演变规律研究[J]. 人民长江,2011,42(17):24-27.

(上接第49页)

- [10] Wheeler H, Evans E, Beddington J. Land use, water management and future flood risk[J]. Land Use Policy, 2009, 26(12):S251-S264.
- [11] 薛偲琦,张瑛,李一平,等. 基于SWMM的南京市内秦淮河中段管网排水能力分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(5):169-173.
- [12] 唐清华,何沛英,朱志华,等. 已建城市排水管网的排涝能力评估方法[J]. 热带地理,2016,36(4):626-632.
- [13] 王祥,张行南,张文婷,等. 基于SWMM的城市雨水管网排水能力分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2011,33(1):5-8.
- [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] 钱海平,陆敏博,韩素华. 城市雨水管道排水能力影响因素分析——以苏州市为例[J]. 净水技术,2016,35(2):80-83.
- [16] 张志军. 城镇排水系统设计运行中的若干问题探讨[J]. 中国给水排水,2010,26(6):45-48+51.
- [17] 芮孝芳,蒋成煜. 中国城市排水之问[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):1-5.
- [18] 谢莹莹. 城市排水管网系统模拟方法和应用[D]. 上海:同济大学. 2007.
- [19] 秦佳伟. 基于SWMM对雨水管网中调蓄池及雨水泵站优化设计的研究[D]. 衡阳:南华大学. 2015.
- [20] 李春林,胡远满,刘森,等. SWMM模型参数局部灵敏度分析[J]. 生态学杂志,2014,33(4):1076-1081.
- [21] 姚雨霖,任周宇,陈忠正,等. 城市给水排水. 第2版[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1986.
- [22] Kibler D F. Urban StormwaterHydrology[M]. American Geophysical Union's WaterResources Monograph,1982:48-60.
- [23] 岑国平,沈晋,范荣生. 城市设计暴雨雨型研究[J]. 水科学进展,1998,9(1):41-46.
- [24] 上海市建设和交通委员会. GB 50014-2006室外排水设计规范(2014年版)[S]. 北京:中国计划出版社,2006.