

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2022.0013

张金萍,张浩锐,方宏远.基于 SWMM 和 SCS 法的城市内涝模拟及雨水管网系统评估[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):110-121. ZHANG J P,ZHANG H R,FANG H Y. Urban waterlogging simulation and rainwater pipe network system evaluation based on SWMM and SCS method[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(1):110-121. (in Chinese)

基于 SWMM 和 SCS 法的城市内涝模拟 及雨水管网系统评估

张金萍^{1,2},张浩锐¹,方宏远¹

(1. 郑州大学水利科学与工程学院,郑州 450001;2. 郑州大学黄河生态保护与区域协调发展研究院,郑州 450001)

摘要:针对郑州市高新区城市排水特点,应用暴雨洪水管理模型(stom water management model, SWMM)模型建立城市排水模型,其中下渗模型采用径流曲线数(soil conservation service curve number, SCS-CN)法体现城市下垫面对城市内涝的影响。利用该模型对不同重现期实测降雨条件下的超载管段和积水节点进行模拟分析:根据超载时长将超载管段划分为安全超载管段、积水超载管段和内涝超载管段;根据积水时长将积水节点划分为积水点、内涝点和洪涝点;同时根据不同重现期降雨条件下的管网流量与管网最大充满度,将超载管段分为 4 种情况。研究结果表明:模型能较好地模拟郑州市高新区城市暴雨内涝情况,但高新区雨水管网系统不能很好地应对郑州市排水规范中的设计重现期暴雨;郑州市高新区排水管网超载管段和积水节点产生原因各有不同,但二者具有紧密的正相关关系,超载管段两端的节点更易产生溢流,由此形成 4 个明显的易涝区。

关键词:SWMM 模型;径流曲线数法;管网超载;节点溢流;城市内涝

中图分类号:TV122;TU992.4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



随着城市化进程的加快,城市下垫面发生了巨大改变,植被裸地大面积减少,建筑道路大面积增加,城市区域不透水率显著增大,雨水的下渗量减少,一旦遭遇强降水或连续性降水,城市排水系统无法快速排出地表雨水,就会引起城市内涝灾害^[1-3]。

想要改变城市内涝问题日益突出的现状,城市雨水管网系统的完善和改造是重点,然而我国大部分城市的雨水管网系统设计标准较低,无法应对较高重现期的极端暴雨^[4]。应用水文模型模拟不同重现期降雨的城市内涝过程能较好地分析现状雨水管网运行情况,并为改善城市排水系统和解决城市内涝问题提供思路。20 世纪 80 年代以来,随着遥感技术^[5-7]和地理信息系统^[8-9]的发展及其在水文学上

的广泛应用,城市水文学研究取得显著性进展,且在此期间开发了许多城市水文模型,如暴雨洪水管理模型(stom water management model, SWMM)、STORM、hydrological simulation program-fortran (HSPF)、Wallingford model 等^[10],其中 SWMM 模型因其具有诸多优点得到广泛应用。例如:曹梦然等^[11]基于 SWMM 分析了南京市秦淮区不同重现期暴雨情景下的管网节点积水情况,并选用淹没积水深度和淹没时长 2 个因素划分内涝风险等级;朱呈浩等^[12]运用 SWMM 模型模拟了西安市沣西新城区的洪涝过程,并根据溢流节点的积水深度进行了风险评估;宋耘等^[13]基于 SWMM 模拟了南京市 2011 年“7·18”暴雨的内涝过程,拟合出了地表积

收稿日期:2021-02-19 修回日期:2021-07-22 网络出版时间:2021-08-02

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210730.1749.005.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0406501);2019 年度河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目

作者简介:张金萍(1979—),女,河南沁阳人,教授,博士,博士生导师,主要从事水资源开发利用与管理研究。E-mail:jinpings2000_zh@163.com

通信作者:张浩锐(1998—),男,河北宁晋人,主要从事水资源开发利用与管理研究。E-mail:791724316@qq.com

水量与最大积水深度的函数关系;张士官等^[14]基于 SWMM 模拟了某老城区雨水管网现状,分析了检查井节点溢流与管网超载状况,提出多种传统改造方案。当前研究大多数根据模拟结果中管网超载状况和节点溢流情况进行内涝风险评估或排水系统改造,分析造成管网超载和节点溢流的影响因素以及二者之间联系的研究尚不多见。因此,本文应用 SWMM 模型建立郑州市高新区的城市排水模型,输入 3 场不同重现期的实测降雨进行模拟,结合模拟结果对高新区的排水管网系统进行综合分析,总结管网超载和节点溢流的主要影响因素以及二者之间的联系,为高新区排水管网系统改善和城市内涝问题治理提供参考。

1 研究区概况

郑州市高新区位于郑州市城区西北部,全区管

辖面积 99 km²,东接环城快速路,南临西流湖,西接西南绕城高速公路,北临连霍高速公路。该区位于平原地区,平均坡度 0.29%,整体地势西高东低、南高北低,海拔高度 98~119 m。其气候条件为温带大陆性季风气候,四季分明,全年平均降雨量 542.2 mm,降水四季分配不均,多集中于夏季,春旱夏涝现象尤为严重^[15]。其下垫面情况见图 1,其中:水域约占 2.14%;林地约占 7.12%;草地约占 11.61%;耕地约占 19.97%;建筑约占 24.5%;未利用土地约占 8.73%;道路约占 25.93%。高新区的净雨通过雨水管网汇集排放到索河和须水河中,最终排入贾鲁河后流出郑州市。高新区是 1988 年启动筹建的河南省第一个开发区,经过 30 多年的快速发展,已经成为中国中部颇具竞争力的高新技术产业高地,因此,降低该区的内涝风险、改善城市排水管网系统具有重大意义。

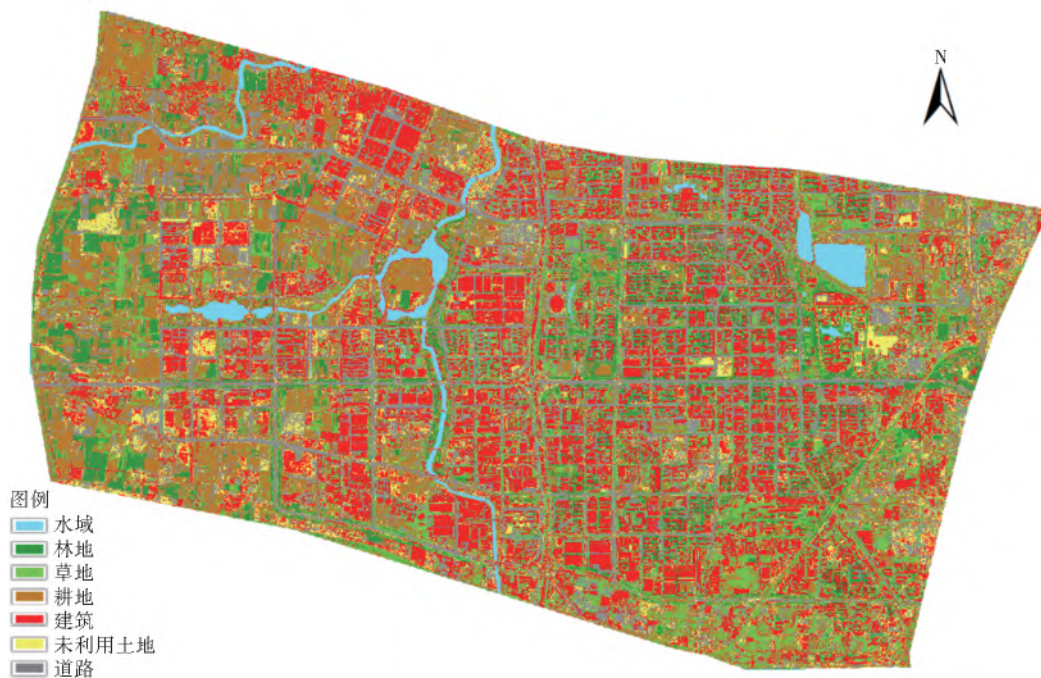


图 1 研究区下垫面情况

Fig. 1 Underlying surface conditions in the study area

2 数据与方法

2.1 基础数据

水文气象数据。研究中所采用的水文气象数据主要包括降雨、径流和积水点及其分布,其中降雨数据来源于高新区的气象站点,由于高新区当地缺乏相应的径流数据,因此后续在模型验证时采用了综合径流系数法,积水点及其分布来源于郑州市市政工程管理处勘测设计研究所。

下垫面数据。下垫面数据主要包括研究区的土

地利用类型数据、DEM 高程数据,由地理空间数据云下载高新区的遥感影像数据,应用 ENVI 的监督分类功能将其土地利用类型分为 7 类:水域、林地、草地、耕地、建筑、未利用土地和道路。DEM 高程数据采用了地理空间数据云中 ASTER GDEM 30M 分辨率数字高程数据。

管网数据。高新区管网数据从郑州市排水工程规划中获取,其分布情况见图 2,该区共有 180 根管段,管段总长度 101 191 m,最小管径为 500 mm,最大管径为 2 000 mm。



图 2 研究区排水管网分布

Fig. 2 Distribution of drainage pipe network in the study area

2.2 SWMM 模型

SWMM 模型是美国环保署 (Environmental Protection Agency, EPA) 于 1971 年开发的动态降雨-径流模拟计算程序, 主要用于城市区域径流水量和水质的单一事件或者长期(连续)模拟^[16]。软件的功能由 4 个模型决定: 水文模型、水力模型、水质模型和低影响开发模型 (low impact development, LID), 即根据输入模型的降雨数据和模型系统的处理特性, 模拟地表径流、管网汇流、雨水调蓄设施处理和水质评价^[17]。本次研究拟建立雨水管网模型模拟城市内涝过程并对城市管网系统的风险性进行分析, 整个模拟过程主要包括以下 3 个过程。

地表产流过程。SWMM 模型将一片区域划分为 3 部分, 分别为透水面积 A_1 、有洼不透水面积 A_2 和无洼不透水面积 A_3 , 其中: A_1 上的产流不仅要扣除填洼量, 还要扣除下渗引起的初损; A_2 上的产流等于其上的降雨量减去初损即填洼量; A_3 上的产流等于其上的降雨量减蒸发量。

地表汇流过程。SWMM 模型的地表汇流计算采用非线性水库模型, 即联立求解连续方程和曼宁方程^[18]。

管网汇流过程。SWMM 模型管网汇流分为恒定流、运动波和动力波: 恒定流法认为管道中的水流状态是均匀恒定的理想状态, 与实际情况不符; 运动波法假设管渠中水面坡度即管道坡度, 对有

压流、回水逆流、滞水等模拟有局限性, 且仅支持模拟树状管网^[18]; 动力波可考虑管段的入口及出口损失, 可模拟封闭管渠有压流及一些复杂多变水流状态。因此, 本次研究选用动力波进行管网汇流计算。

3 模型建立

3.1 子汇水区划分

应用 ArcGIS 处理高新区的 DEM 数据进行坡度和坡向分析, 大致确定地表雨水的汇流方向和汇流范围, 再以高新区的土地利用类型分类、建筑物分布、道路以及河流水系作为参考进行划分, 全区总共划分为 158 个子汇水区, 见图 3。

3.2 降雨数据输入

郑州市排水规范中的暴雨强度计算公式^[19]为

$$i = \frac{32.9(1+0.965\lg P)}{(t+24.8)^{0.929}} \quad (1)$$

式中: i 为暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; P 为设计暴雨重现期, a ; t 为设计暴雨总历时, min 。

根据郑州市总体规划, 郑州市中心城区暴雨重现期规划一般为 1~5 a。根据式(1)计算重现期分别为 1、2、5 a 的降雨量, 并从实测降雨资料中选择雨量、雨强基本对应的 3 场实测降雨作为基础数据进行模型输入与模拟, 分析在这 3 场降雨情况下高新区管网超载及节点溢流情况。表 1 为 3 场实测降雨的特征值。

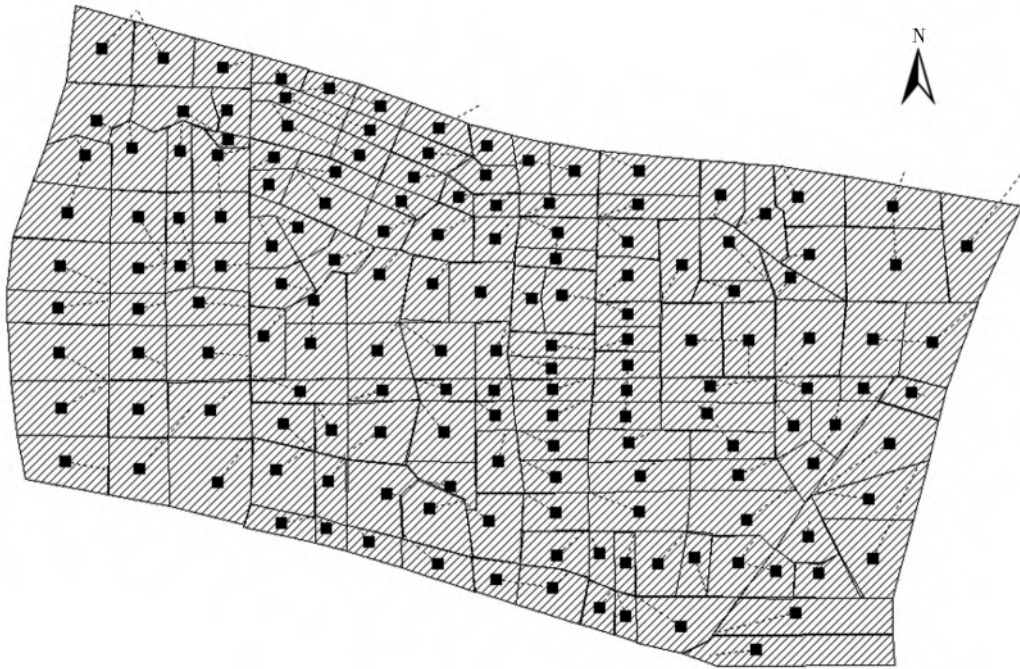


图3 研究区子汇水区分布

Fig. 3 Distribution map of subcatchment area in the study area

表1 3场实测降雨特征值

Tab. 1 Three measured rainfall characteristic values

| 降雨场次 | 重现期/a | 总雨量/mm | 总历时/min | 平均雨强/(mm · h ⁻¹) | 雨峰系数 |
|----------|-------|--------|---------|------------------------------|-------|
| 20180515 | 1 | 22.0 | 40 | 33 | 0.125 |
| 20170807 | 2 | 42.0 | 70 | 36 | 0.214 |
| 20170812 | 5 | 63.5 | 110 | 34 | 0.269 |

3.3 下渗模型选取

高新区作为新建城区,土地利用、土壤类型复杂多样,耕地、林地、草地以及未利用土地的面积仍有较大比例,同一子汇水区包含多种土地利用、土壤类型的情况不在少数,而这些汇水区域与不透水率较高的密集城区相比下渗作用有较大的差异,常用于密集城区的 Horton 模型对于透水面基本采用统一的入渗公式计算,没有考虑不同透水性地面的差别对入渗过程的影响^[20]。径流曲线数法适用于下垫面、土壤类型复杂多样的地区^[18],该方法能较好地体现高新区复杂下垫面条件下城区的下渗作用。因此,本次研究的下渗模型选用径流曲线系数法。

径流曲线数法(curve number method)的核心就是确定汇水区的 CN 值,CN 值可通过汇水区下垫面的土壤类型、土地利用类型以及土壤前期湿润程度确定^[21]。模型子汇水区 CN 值计算方法如下:查阅相关文献资料^[22],确定郑州市高新区的土壤类型属于 B 类土壤(表 2 为径流曲线数法土壤类型分类),从而可查 SCS-CN 表确定 B 类土壤、AMC II 条件下的 CN 值(表 3);径流曲线数法中利用前 5 d

的降雨深度作为依据,将前期土壤湿润程度划分为 3 个等级^[23],郑州市高新区由于全年降雨次数少且集中在夏季,因此其平均前期土壤湿润程度为较为干旱的 AMC I,再查 CN 换算表确定 B 类土壤、AMC I 条件下的 CN 值(表 3);应用 ENVI 的兴趣区域工具统计每个子汇水区各土地利用类型的面积占比;用面积对子汇水区中各土地利用类型的 CN 值进行加权平均计算,即可求得每个子汇水区的 CN 值。

表2 土壤类型分类

Tab. 2 Soil type classification

| 土壤分类 | 土壤特征 |
|------|---------------------|
| A | 土层较厚,多为沙和黄土,渗透性较强 |
| B | 土层较薄,多为沙壤土和黄土,渗透性良好 |
| C | 轻壤土,黏壤土,渗透性一般 |
| D | 多为黏土,塑性大,渗透性差 |

3.4 参数确定

SWMM 模型参数分为确定性参数和不确定性参数,其中:确定性参数例如管网长度形状、尺寸等以及子汇水区面积、坡度、不透水率等是通过基础数

据处理或从郑州市排水工程规划中获取,特征宽度选用公式 $W=2.29A^{0.4}$ 计算求得,式中 A 为子汇水区的面积;非确定性参数是通过参考相关文献来确定^[24],例如透水区、不透水区、管道、河道的曼宁系数分别取 0.180、0.021、0.014、0.030,透水区和不透水区的洼地蓄水量分别取 6.8、3.5。

表 3 CN 值换算
Tab.3 CN value conversion table

| 土地利用类型 | AMC II | AMC I |
|--------|--------|-------|
| 水域 | 100 | 100 |
| 林地 | 55 | 35 |
| 草地 | 69 | 50 |
| 耕地 | 71 | 52 |
| 建筑 | 98 | 94 |
| 未利用土地 | 80 | 63 |
| 道路 | 98 | 94 |

3.5 模型验证

模型输入 3 场不同重现期降雨得到模拟结果的地表径流连续性误差均为 0,流量演算连续性误差分别为 -0.43%、-0.24% 和 -0.18%,根据模型手册规定,连续性误差小于 2% 可初步判断模拟结果较为合理。由于缺少实测的径流资料,因此以输入模型的 3 场实测降雨数据为基础,应用综合径流系数法进一步验证模型^[25-26]。根据子流域径流系数,以子流域面积为权重,求得各子流域径流系数的加权平均数,即本研究区域的综合径流系数。经计算,求得表 1 中 3 场实测降雨数据的综合径流系数依次为 0.658、0.667、0.682,与郑州市排水工程规划中规定的密集城区径流系数 0.650 相近,且高新区实测的 5 个积水点位置与模拟结果中的积水点位置一一对应,见图 4,故认为该模型具有较好的适用性。

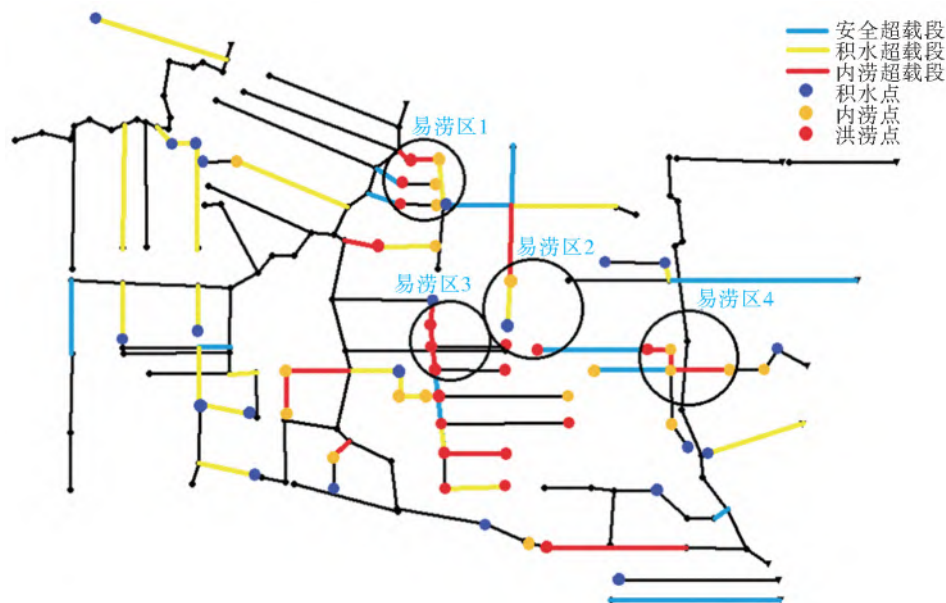


图 4 研究区易涝区

Fig. 4 Waterlogging prone area in the study area

4 结果分析

4.1 管网超载分析

管网超载运行特性。管段满管和管段超载是衡量排水管网运行能力的重要评价指标。管段满管是

指管段的充满度为 1,而管段超载是指管段存在非正常流动现象。非正常流动现象是指管段由于实际流量大于满流流量(指管段恰好充满时的流量)或实际流速较大而造成的管段超负荷现象。表 4 显示出不同重现期降雨条件下排水管网的运行特性。

表 4 不同降雨重现期管网运行特性

Tab.4 Overall evaluation of pipe network characteristics in different rainfall return periods

| 重现期/a | 满管数量/根 | 满管率/% | 满管最大流速小于最小设计流速 0.75 m/s 的管段数量/根 | 最大流速大于最大设计流速 4 m/s 的管段数量/根 | 超载管段数量/根 | 管段超载率/% |
|-------|--------|-------|---------------------------------|----------------------------|----------|---------|
| 1 | 7 | 4.40 | 0 | 0 | 7 | 4.40 |
| 2 | 39 | 24.53 | 0 | 0 | 39 | 24.53 |
| 5 | 54 | 33.96 | 0 | 3 | 51 | 32.08 |

由表 4 可知,管段满管率和管段超载率随着降雨重现期增大而增大:降雨重现期为 1 a 时,管段满管率为 4.4%,管段超载率为 4.4%;降雨重现期为 2 a 时,管段满管率为 24.53%,管段超载率为 24.53%;降雨重现期增加到 5 a,管段满管率为 33.96%,管段超载率为 32.08%,且有 3 根管段的最大流速超过了规范中管段的最大设计流速。

超载管段情况分析。管网超载主要是管网流量异变,管网最大充满度发生变化。根据 3 场不同重现期降雨条件下管网流量与管网最大充满度,可将超载管段分为 4 种情况:第 1 种情况,最大流量/满流流量 >1 ,最大充满度 $=1$;第 2 种情况,最大流量/满流流量 >1 ,最大充满度 <1 ;第 3 种情况,最大流量/满流流量 <1 ,最大充满度 $=1$;第 4 种情况,最大流量/满流流量 <1 ,最大充满度 <1 。在 3 场实测降雨模拟结果中,这 4 种情况的超载管段数分别占超载管段总数的 47.42%、8.25%、15.46%、28.87%,其中,第 1 种情况超载管段比例最高,第 2 种情况最低。

管段的满管时长、超载时长以及满管数量随着降雨重现期的增大而增大,同时超载管段内部的情况呈现由不超载—第 4 种情况—第 3 种情况—第 2 种情况—第 1 种情况逐渐转变的趋势,见表 5。

随着降雨重现期增加,地表产汇流水量加大,进入管网的雨水也越来越多,管段逐渐被充满并且最

大流量超过满流流量,这也体现了管段由不超载到超载再到严重超载的变化过程,从而导致管段超载时长增加。

表 5 典型超载管段内部情况变化
Tab. 5 Changes in the internal conditions of a typical overloaded pipe section

| 管段序号 | 重现期 | | |
|-----------------|---------|---------|---------|
| | 1 a | 2 a | 5 a |
| C ₃₃ | 第 1 种情况 | 第 1 种情况 | 第 1 种情况 |
| C ₃₂ | 第 2 种情况 | 第 2 种情况 | 第 1 种情况 |
| C ₃₅ | 第 3 种情况 | 第 1 种情况 | 第 1 种情况 |
| C ₄₉ | 第 4 种情况 | 第 1 种情况 | 第 1 种情况 |
| C ₇₇ | 不超载 | 第 2 种情况 | 第 1 种情况 |
| C ₂₇ | 不超载 | 第 3 种情况 | 第 3 种情况 |
| C ₁ | 不超载 | 第 4 种情况 | 第 1 种情况 |
| C ₆₅ | 不超载 | 第 4 种情况 | 第 2 种情况 |
| C ₈₂ | 第 4 种情况 | 第 1 种情况 | 第 1 种情况 |
| C ₁₁ | 不超载 | 第 4 种情况 | 第 3 种情况 |
| C ₁₈ | 不超载 | 第 4 种情况 | 第 3 种情况 |
| C ₆₆ | 不超载 | 第 4 种情况 | 第 3 种情况 |
| C ₈₈ | 不超载 | 第 4 种情况 | 第 2 种情况 |
| C ₆₁ | 不超载 | 第 4 种情况 | 第 3 种情况 |

超载管段等级划分。根据管段超载时长的特点将超载管段分为 3 个等级,分布情况见图 5。具体内容如下:

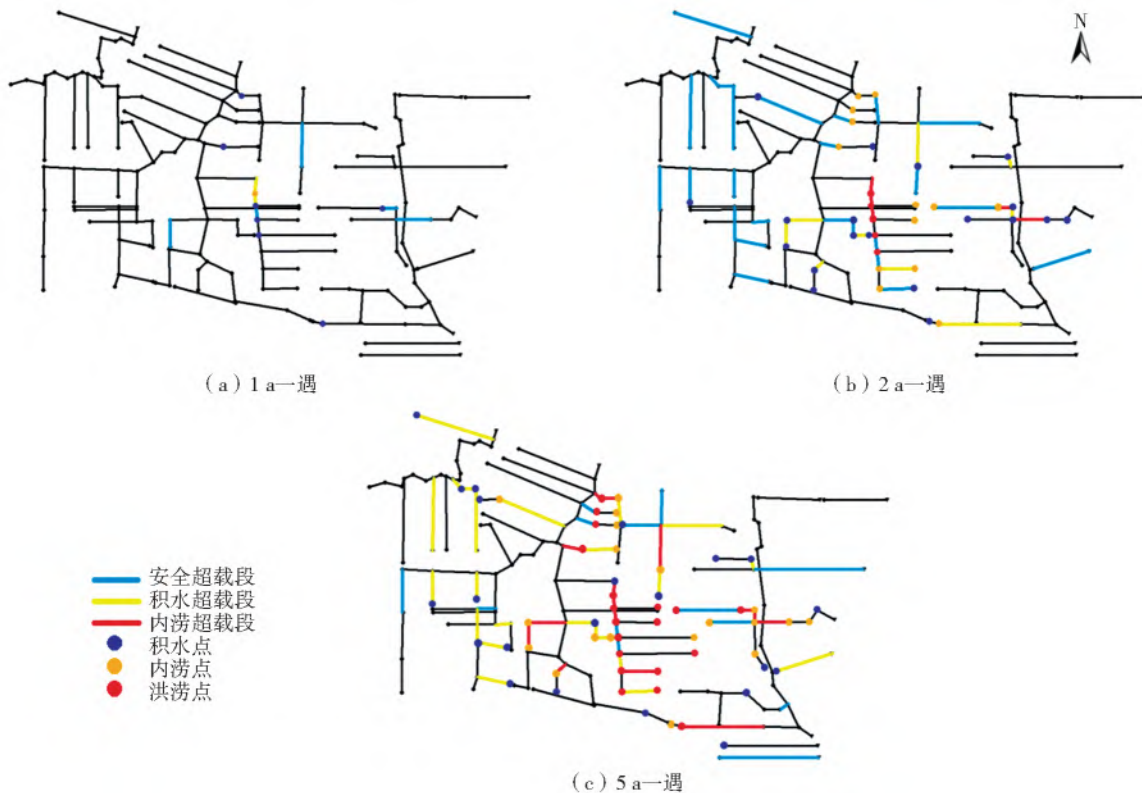


图 5 不同重现期降雨条件下超载管段和积水节点等级分布

Fig. 5 Distribution map of overloaded pipe sections and stagnant nodes under rain conditions in different return periods

0~1 h 为安全超载管段,雨水管段可以迅速排出城市子汇水区的雨水,超载时间较短,对管段寿命影响较小,两端节点没有产生积水或一端产生积水,大部分为短历时积水,对城市交通和居民生活影响小,个别管段两端节点产生长时间积水也是由于上下游连接了积水超载段或内涝超载段。

1~2 h 为积水超载管段,雨水管段不能迅速排出城市子汇水区的雨水,超载时间较长,对管段寿命影响较大,两端节点大部分都产生积水,节点积水时间较长,表明积水在地表停留一段时间,对城市交通和居民生活影响较大。

大于 2 h 为内涝超载管段,雨水管段严重超负荷,管段很难满足周围子汇水区的雨水排放量,超载时间很长,对管段寿命影响很大,两端节点大部分都产生积水,节点积水时间长、范围大、深度深,并且影响上下游管段的超载性,由于积水量

大、在地面滞留时间长,因此易造成城市严重的内涝问题。

超载管段原因分析。对不同等级下的超载管段进行分析,发现超载管段的超载原因主要分为主动超载和被动超载两种,其中:主动超载是单根管段超载,该管段周围通常子汇水区面积大、不透水率高,在降雨重现期较低的情况下管段两端节点大部分不产生积水,能快速排出地面雨水量,仅在重现期较高的情况下易造成管段两端节点产生积水;被动超载是两根及以上的管段系统超载,某根管段由于上下游连接了超载较为严重的主动超载管段,导致连接在一起的这两根或多根管段共同超载,无论降雨重现期高低,都易造成整个管段系统周围节点和内部连接点产生积水。表 6 反映了不同重现期降雨条件下不同等级典型超载管段特性及超载原因。

表 6 不同重现期降雨条件下不同等级典型超载管段特性及超载原因
Tab. 6 Characteristics of different grades of typical overloaded pipe sections and causes of overloading under different rainfall conditions in different return periods

| 重现期/a | 超载段等级 | 管段序号 | 超载时间/h | 上下游连接管段超载情况 | 两端节点积水情况 | 周围汇水区不透水率/% | 周围汇水区总面积/hm ² | |
|-------|-------|------------------|-----------------|---------------|---------------|-------------|--------------------------|-------|
| 1 | 安全超载段 | C ₃₅ | 0.04 | 下游积水超载 | 均产生积水 | 67.53 | 46.07 | |
| | | C ₈₂ | 0.77 | 均不超载 | 均不产生积水 | 76.60 | 60.89 | |
| | 积水超载段 | C ₃₃ | 2.03 | 上游安全超载/下游积水超载 | 均产生积水 | 65.67.36 | 81.19 | |
| 2 | 安全超载段 | C ₄₁ | 0.05 | 上游内涝超载/下游安全超载 | 均产生积水 | 52.67 | 83.53 | |
| | | C ₁₇₆ | 0.13 | 均不超载 | 均不产生积水 | 29.48 | 162.30 | |
| | | C ₄₅ | 0.27 | 上游内涝超载 | 上游节点积水 | 62.69 | 71.10 | |
| | | C ₇₀ | 0.33 | 均不超载 | 均不产生积水 | 48.79 | 81.09 | |
| | | C ₆₅ | 0.87 | 上游内涝超载 | 均不产生积水 | 61.48 | 135.60 | |
| | 积水超载段 | C ₄₉ | 1.80 | 下游内涝超载 | 均产生积水 | 70.55 | 100.00 | |
| | | C ₅₃ | 1.21 | 均不超载 | 上游节点积水 | 47.56 | 109.74 | |
| | | C ₄₈ | 1.39 | 上游内涝超载 | 上游节点积水 | 70.55 | 100.00 | |
| | | 内涝超载段 | C ₃₅ | 2.68 | 下游内涝超载 | 均产生积水 | 67.53 | 46.07 |
| | | | C ₈₂ | 2.49 | 上游内涝超载 | 均产生积水 | 76.60 | 60.89 |
| 5 | 安全超载段 | C ₃₃ | 5.83 | 上下游均内涝超载 | 均产生积水 | 65.67.36 | 81.19 | |
| | | C ₂₇ | 0.50 | 均不超载 | 上游节点积水 | 54.66 | 92.78 | |
| | | C ₈₃ | 0.67 | 下游内涝超载 | 均产生积水 | 72.60 | 90.76 | |
| | | C ₂₁ | 0.63 | 上游积水超载和内涝超载 | 均不产生积水 | 59.61 | 114.23 | |
| | | C ₁₇₆ | 0.81 | 均不超载 | 均不产生积水 | 29.48 | 162.30 | |
| | 积水超载段 | C ₄₁ | 1.20 | 上游内涝超载/下游安全超载 | 均产生积水 | 52.67 | 83.53 | |
| | | C ₄₅ | 1.60 | 上游积水超载 | 上游节点积水 | 62.69 | 71.10 | |
| | | C ₇₀ | 1.07 | 均不超载 | 均不产生积水 | 48.79 | 81.09 | |
| | | C ₆₅ | 1.59 | 上游积水超载/下游安全超载 | 上游节点积水 | 61.48 | 135.60 | |
| | | C ₄₉ | 2.82 | 下游内涝超载 | 均产生积水 | 70.55 | 100.00 | |
| | | C ₅₃ | 2.06 | 均不超载 | 上游节点积水 | 47.56 | 109.74 | |
| | | C ₄₈ | 2.48 | 上游内涝超载 | 上游节点积水 | 70.55 | 100.00 | |
| | | 内涝超载段 | C ₃₅ | 6.09 | 上游安全超载/下游内涝超载 | 均产生积水 | 67.53 | 46.07 |
| | | | C ₈₂ | 4.22 | 上游内涝超载和安全超载 | 均产生积水 | 76.60 | 60.89 |
| | | | C ₃₃ | 9.19 | 上下游均内涝超载 | 均产生积水 | 65.67.36 | 81.19 |

由表 6 可知:安全超载管段主动超载是因为管段周围汇水区不透水率高、面积大,造成管段短时间的超载;积水超载管段主动超载是因为管段周围汇水区不透水率高、面积大,造成管段较长时间的超载;内涝超载管段主动超载是因为管段周围汇水区不透水率高、面积大且数量多,造成管段很长时间的超载。在 3 种等级下超载管段的被动超载则均是由于上下游连接管段中有积水超载段或内涝超载段,造成本不应超载的管段短时间的超载现象。被动超载管段上下游连接管段的数量和超载时长严重影响着该管段的超载时长,其超载时长会随着它上下游连接超载管段的数量增加、等级变化以及超载时长延长而延长。

因此可以得出:安全超载段能较快速排出地面雨水,对管段寿命影响较小,且不易造成连接管段节点积水或积水时间短;对于主动超载和被迫超载组成的超载系统(由多根安全超载管段和积水或内涝超载管段形成的管段超载系统),增大其中的影响周围管段超载性较大管段的尺寸、坡度或降低其周围汇水区的不透水率,可以改善整个管段超载系统;积水超载段和内涝超载段容易使周围管段出现短时间的被迫超载现象——被迫安全超载段。

4.2 节点溢流分析

积水节点等级划分。随着降雨重现期的增大,积水节点的数量也随之增多。降雨重现期为 1 a 时

有 8 个节点产生积水,降雨重现期为 2 a 时有 37 个节点产生积水,降雨重现期为 5 a 时有 60 个节点产生积水。

根据郑州市市政排水管理部门相关标准,认为积水时长在 2 h 以内的积水点可以迅速排出,不会产生内涝,由此根据积水节点的积水小时数对其进行等级划分,划定积水小时数 0~2 h 为积水点、2~4 h 为内涝点、大于 4 h 为洪涝点。不同重现期降雨条件下积水节点统计情况见表 7,分布情况见图 5。

表 7 不同重现期降雨条件下积水节点统计情况

Tab. 7 Statistics of stagnant water nodes under rain conditions in different return periods

| 重现期/a | 总积水点数 | 积水时长/h | 积水点数 |
|-------|-------|--------|------|
| 1 | 8 | 0~<2 | 7 |
| | | 2~4 | 1 |
| | | >4 | 0 |
| 2 | 37 | 0~<2 | 19 |
| | | 2~4 | 13 |
| | | >4 | 5 |
| 5 | 60 | 0~<2 | 25 |
| | | 2~4 | 16 |
| | | >4 | 19 |

积水点积水原因分析。对市政部门提供的高新区 5 个实测积水点所处位置的地理特性和环境特性进行分析,实测积水点空间地理环境见图 6。



图 6 实测积水点空间地理环境

Fig. 6 Geographical environment map of measured water points

实测积水点 1:该节点位于高新区的密集城区和管网密集的路口,排入该节点的汇水区不透水率为 66.96%,CN 值为 80.530 0,雨水下渗量少,排入节点的雨水量多,使节点易产生积水。

实测积水点 2:该节点位于高新区的密集城区和管网密集的路口,为 3 个子汇水区的排放口,不透水率分别为 43.17%、45.81%、59.88%,CN 值分别为 67.477 8、67.809 9、76.968 0,雨水下渗量少,排入节点的雨水量多,使节点易产生积水。

实测积水点 3:该节点位于高新区的密集城区和管网密集的路口,为 2 个子汇水区的排放口,不透水率分别为 61.11%、64.01%,CN 值分别为 76.260 4、77.434 5,雨水下渗量少,排入节点的雨水量多,使节点易产生积水。

实测积水点 4:该节点位于高新区的密集城区和管网密集的路口,为 3 个子汇水区的排放口,不透水率分别为 72.99%、48.03%、76.24%,CN 值分别为 83.154 6、74.770 0、85.519 1,雨水下渗量少,排入节点的雨水量多,使节点易产生积水。

实测积水点 5:该节点位于高新区的密集城区和管网密集的路口,为 3 个子汇水区的排放口,子汇水区不透水率分别为 68.82%、57.19%、33.49%,CN 值分别为 81.221 4、75.275 4、63.434 3,雨水下渗量少,排入节点的雨水量多,使节点易产生积水。

可见积水点产生的主要影响因素有汇水区不透水率、汇水区 CN 值、汇水区总面积、城市密集程度以及管网密集程度。表 8 为在不同重现期降雨条件下模型模拟的典型积水节点影响因素分析。

表 8 不同重现期模型模拟的典型积水节点影响因素分析

Tab. 8 Analysis of influencing factors of typical stagnant nodes simulated by models with different return periods

| 重现期/a | 积水节点 | 积水时间/h | 不透水率/% | CN 值 | 汇水区总面积/hm ² | 城市密集区 | 管网密集路口 |
|-------|-----------------|--------|--------|------|------------------------|-------|--------|
| 1 | J ₄₀ | 0.41 | 60 | 76 | 40.03 | 是 | 否 |
| | J ₂₅ | 1.31 | 75 | 85 | 30.29 | 是 | 否 |
| | J ₄₄ | 2.59 | 65 | 74 | 31.98 | 是 | 是 |
| 2 | J ₅₉ | 0.53 | 62 | 79 | 20.56 | 是 | 否 |
| | J ₆₃ | 1.55 | 55 | 76 | 70.32 | 否 | 否 |
| | J ₄₀ | 3.72 | 60 | 76 | 40.03 | 是 | 否 |
| | J ₂₅ | 3.87 | 75 | 85 | 30.29 | 是 | 否 |
| | J ₄₄ | 6.34 | 65 | 74 | 31.98 | 是 | 是 |
| | J ₇₉ | 0.98 | 48 | 72 | 58.36 | 否 | 否 |
| 5 | J ₅₉ | 1.75 | 62 | 79 | 20.56 | 是 | 否 |
| | J ₆₃ | 2.63 | 55 | 76 | 70.32 | 否 | 否 |
| | J ₄₀ | 5.16 | 60 | 76 | 40.03 | 是 | 否 |
| | J ₂₅ | 5.38 | 75 | 85 | 30.29 | 是 | 否 |
| | J ₄₄ | 9.28 | 65 | 74 | 31.98 | 是 | 是 |

4.3 管段和节点综合分析

由图 5 可以看出,管段超载和节点溢流有着十分紧密的联系,随着降雨重现期的增大,超载管段数量和积水节点数量均增多,超载管段两端的节点易产生溢流,且大部分情况下超载等级较高的管段的上下游节点积水等级也较高,二者具有紧密的正相关关系。

根据高新区的超载管段和溢流节点的密集程度以及实测积水点分布,可以明显看出高新区有 4 个易涝区,见图 4(以降雨重现期 5 a 一遇为例)。这 4 个易涝区均处于高新区的密集城区、商业区和管网密集的路口,并与高新区实测积水点位置大体一致。

5 结 论

在 SWMM 模型构建中下渗模型选择了径流曲

线数法,高新区 3 场实测降雨模拟结果计算得出的综合径流系数与郑州市排水工程规划中规定的郑州市密集城区综合径流系数相近,且高新区实测的 5 个积水点与模拟结果中的积水点相对应,因此认为该下渗模型在下垫面类型复杂的郑州市高新区有较好的适用性。

模拟结果表明郑州市高新区的雨水管网系统可有效抵御重现期 1 a 的降雨,而在遇到重现期 2 a 及以上的降雨时,会出现不同程度的管段超载和节点溢流现象,因此郑州市高新区雨水管网系统无法满足郑州市排水工程规划中要求的 1~5 a 的暴雨重现期规划。

根据 3 场不同重现期降雨条件下管网流量与管网最大充满度,可将超载管段分为 4 种情况:第 1 种

情况,最大流量/满流流量 >1 ,最大充满度 $=1$;第2种情况,最大流量/满流流量 >1 ,最大充满度 <1 ;第3种情况,最大流量/满流流量 <1 ,最大充满度 $=1$;第4种情况,最大流量/满流流量 <1 ,最大充满度 <1 。管段的满管时长、超载时长以及满管数量随着降雨重现期的增大而增大,同时超载管段内部的情况呈现由不超载—第4种情况—第3种情况—第2种情况—第1种情况逐渐转变的趋势。

分别对郑州市高新区的超载管段和积水节点进行了等级划分:根据超载时长将超载管段分为安全超载管段、积水超载管段和内涝超载管段;根据积水时长将积水节点分为积水点、内涝点和洪涝点。管段超载有主动和被动两种情况,其主要影响因素为上下游管段超载情况、两端节点积水情况以及周围汇水区不透水率及其总面积;节点积水的主要影响因素为汇水区不透水率、CN值、总面积以及城市和管网的密集程度。

管段超载和节点溢流存在一定的联系,随着降雨重现期的增大,超载管段数量和积水节点数量均增多,超载管段两端的节点易产生溢流,且大部分情况下超载等级较高管段的上下游节点积水等级也较高,二者具有紧密的正相关联系,由此导致高新区具有4个明显的易涝区。

参考文献(References):

- [1] 徐宗学,赵刚,程涛.“城市看海”:城市水文学面临的挑战与机遇[J]. 中国防汛抗旱,2016,26(5):54-55,57. (XU Z X,ZHAO G,CHENG T. "The city sees the sea":Challenges and opportunities faced by urban hydrology[J]. China National Defense Flood and Drought Relief,2016,26(5):54-55,57. (in Chinese)) DOI:10.16867/j.cnki.cfdm.2016.05.020.
- [2] 王伟武,汪琴,林晖,等.中国城市内涝研究综述及展望[J]. 城市问题,2015(10):24-28. (WANG W W,WANG Q,LIN H,et al. Summarization and prospects of research on urban waterlogging in China[J]. Urban Issues,2015(10):24-28. (in Chinese)) DOI:10.13239/j.bjsshkxy.cswt.151004.
- [3] 陈倩云,余弘婧,高学睿,等.当前我国城市内涝问题归因分析与应对策略[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(1):55-63. (CHEN Q Y,YU H J,GAO X R,et al. Attribution analysis and countermeasures of current urban waterlogging problems in China[J]. Journal of North China University of Water Resources and Hydropower (Natural Science Edition),2019,40(1):55-63. (in Chinese)) DOI:10.19760/j.ncwu.zk.2019008.
- [4] 杨严,彭海琴.城市排水系统内涝风险评估[J]. 净水技术,2018,37(8):116-121. (YANG Y,PENG H Q. Waterlogging risk assessment of urban drainage system [J]. Water Purification Technology,2018,37(8):116-121. (in Chinese)) DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2018.08.022.
- [5] 童庆禧,孟庆岩,杨杭.遥感技术发展历程与未来展望[J]. 城市与减灾,2018(6):2-11. (TONG Q X,MENG Q Y,YANG H. The development history and future prospects of remote sensing technology[J]. Cities and Disaster Reduction,2018(6):2-11. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:CSJZ.0.2018-06-003.
- [6] 杨光.分布式水文模型构建中遥感技术的应用[J]. 黑龙江水利科技,2016,44(11):94-97. (YANG G. Application of remote sensing technology in the construction of distributed hydrological model[J]. Heilongjiang Water Conservancy Science and Technology,2016,44(11):94-97. (in Chinese)) DOI:10.14122/j.cnki.hskj.2016.11.033.
- [7] 赵希.遥感技术在水文水资源领域中的应用分析[J]. 环境与发展,2020,32(12):62-63,66. (ZHAO X. Application analysis of remote sensing technology in the field of hydrology and water resources[J]. Environment and Development,2020,32(12):62-63,66. (in Chinese)) DOI:10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2020.12.031.
- [8] 张腾飞,高多多,魏广. GIS技术在水文水资源中的应用[J]. 环境与发展,2020,32(8):240-242. (ZHANG T F,GAO D D,WEI G. Application of GIS technology in hydrology and water resources [J]. Environment and Development,2020,32(8):240-242. (in Chinese)) DOI:10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2020.08.138.
- [9] 张翼,计勇,王凯,等.基于地理信息系统的生态水文模型研究进展[J]. 江西水利科技,2020,46(4):265-270. (ZHANG Y,JI Y,WANG K,et al. Research progress of ecological hydrological model based on geographic information system[J]. Jiangxi Water Conservancy Science and Technology,2020,46(4):265-270. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:JXSK.0.2020-04-006.
- [10] 宋利祥,徐宗学.城市暴雨内涝水文水力耦合模型研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2019,55(5):581-587. (SONG L X,XU Z X. Research progress on hydrological and hydrodynamic coupling models of urban rainstorm and waterlogging[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition),2019,55(5):581-587. (in Chinese)) DOI:10.16360/j.cnki.jbnuns.2019.05.005.
- [11] 曹梦然,叶亚平,张其成,等.基于SWMM模型的南京秦淮区暴雨内涝风险分析[J]. 中国农村水利水电,2019(11):110-114. (CAO M R,YE Y P,ZHANG Q

- C, et al. Risk analysis of flooding in the Qinhuai District of Nanjing based on SWMM model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(11):110-114. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;ZNSD. 0. 2019-11-023.
- [12] 朱呈浩,夏军强,陈倩,等. 基于 SWMM 模型的城市洪涝过程模拟及风险评估[J]. *灾害学*, 2018, 33(2): 224-230. (ZHU C H, XIA J Q, CHEN Q, et al. Urban flood process simulation and risk assessment based on SWMM model[J]. *Journal of Catastrophe Science*, 2018, 33(2):224-230. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1000-811X. 2018. 02. 039.
- [13] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. *水利水电科技进展*, 2019, 39(6): 56-61. (SONG Y, LI Q F, NIU M Y, et al. Simulation of heavy rain and waterlogging in a typical flood-prone area in Nanjing based on SWMM model[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources and Hydropower*, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SLSD. 0. 2019-06-010.
- [14] 张士官,吕谋,焦春蛟,等. 基于 SWMM 模型的雨水管网改造方案优化研究[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(2): 114-117. (ZHANG S G, LYU M, JIAO C J, et al. Research on optimization of rainwater pipe network reconstruction scheme based on SWMM model[J]. *Hydropower Energy Science*, 2020, 38(2): 114-117. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SDNY. 0. 2020-02-029.
- [15] 胡彩虹,杜纤,赵彦增,等. 平原地区 SWMM 模型空间尺度确定原则研究:以郑州市为例[J]. *人民珠江*, 2019, 40(12): 18-24. (HU C H, DU X, ZHAO Y Z, et al. Research on the principles of determining the spatial scale of SWMM model in plain areas: Taking Zhengzhou City as an example[J]. *Pearl River*, 2019, 40(12): 18-24. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-9235. 2019. 12. 004.
- [16] JORGE G, LARRY A R, LEWIS A R, et al. A new applications manual for the storm water management model (SWMM) [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2010, 25(6): 813-814. DOI:10. 1016/j. envsoft. 2009. 11. 009.
- [17] 康得军,孙健,匡帅,等. 暴雨洪水管理模型(SWMM)研究应用及发展趋势[J]. *净水技术*, 2019, 38(3): 45-50. (KAGN D J, SUN J, KUANG S, et al. The research application and development trend of the storm flood management model (SWMM)[J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(3): 45-50. (in Chinese)) DOI:10. 15890/j. cnki. jsjs. 2019. 03. 009.
- [18] 张士官,吕谋,焦春蛟,等. 雨洪管理模型 SWMM 原理解析及应用进展[J]. *人民珠江*, 2019, 40(12): 37-42, 69. (ZHANG S G, LYU M, JIAO C J, et al. Principle analysis and application progress of rainwater management model SWMM[J]. *Pearl River*, 2019, 40(12):37-42, 69. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1001-9235. 2019. 12. 007.
- [19] 许拯民,荆燕燕. 关于城市暴雨强度公式推求的研究[J]. *水文*, 2014, 34(3): 53-56. (XU Z M, JING Y Y. Research on the formula of urban rainstorm intensity [J]. *Hydrology*, 2014, 34(3): 53-56. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2014. 03. 010.
- [20] 刘家宏,梅超,向晨瑶,等. 城市水文模型原理[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(5): 1-5, 13. (LIU J H, MEI C, XIANG C Y, et al. Principles of urban hydrological model[J]. *Water Resources and Hydropower Technology*, 2017, 48(5): 1-5, 13. (in Chinese)) DOI:10. 13928/j. cnki. wrahe. 2017. 05. 001.
- [21] 邓景成,高鹏,穆兴民,等. 黄土区 SCS-CN 模型径流曲线数计算方法研究[J]. *人民黄河*, 2018, 40(4): 9-14, 18. (DENG J C, GAO P, MU X M, et al. Study on calculation method of runoff curve number of SCS-CN model in loess area[J]. *Yellow River*, 2018, 40(4): 9-14, 18. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2018. 04. 003.
- [22] 钟国敏,张学雷,段金龙,等. 郑州市土壤多样性和土地利用多样性研究及关联分析[J]. *土壤通报*, 2013, 44(3): 513-521. (ZHONG G M, ZHANG X L, DUAN J L, et al. Soil diversity and land use diversity research and association analysis in Zhengzhou City[J]. *Soil Bulletin*, 2013, 44(3): 513-521. (in Chinese)) DOI: 10. 19336/j. cnki. trtb. 2013. 03. 001.
- [23] 刘春春. 基于 SWMM 和 SCS 模型的清河流域径流模拟研究[D]. 西安:西北大学, 2018. (LIU C C. Research on the Qinghe River basin runoff simulation based on SWMM and SCS model[D]. Xi'an: Northwest University, 2018. (in Chinese)) DOI:CNKI;CDMD;2. 1018. 110940.
- [24] 李世豪. 郑州市区洪涝风险分析及内涝积水模拟研究[D]. 郑州:郑州大学, 2016. (LI S H. Flood risk analysis and waterlogging simulation research in Zhengzhou City [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016. (in Chinese)) DOI: CNKI; CDMD; 2. 1016. 174321.
- [25] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. *给水排水*, 2009, 45(11): 213-217. (LIU X P. Calibration method of urban rainfall runoff model parameters based on runoff coefficient[J]. *Water & Wastewater*, 2009, 45(11): 213-217. (in Chinese)) DOI:10. 13789/j. cnki. ww1964. 2009. 11. 057.

- [26] 张曼,周可可,张婷,等. 城市典型 LID 措施水文效应及雨洪控制效果分析[J]. 水力发电学报, 2019, 38(5): 57-71. (ZHANG M, ZHAO K K, ZHANG T, et al. Analysis of hydrological effects and storm flood control effects of typical urban LID measures [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(5): 57-71. (in Chinese)) DOI: 10. 13789/j. cnki. wwel964. 2009. 11. 057.

Urban waterlogging simulation and rainwater pipe network system evaluation based on SWMM and SCS method

ZHANG Jinping^{1,2}, ZHANG Haorui¹, FANG Hongyuan¹

(1. School of Water Conservancy Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Yellow River Ecological Protection and Regional Coordinated Development Research Institute,

Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization, the underlying surface of a city has undergone tremendous changes. The area of bare vegetation has been reduced, and the area of construction roads has increased. This has significantly increased the impermeability of urban areas, reduced the amount of rainwater infiltration, and condensed the drainage system. Surface rain can not be discharged quickly, and urban flood disasters occur frequently. To change the urban waterlogging problem, the improvement and transformation of urban rainwater pipe network systems are the key points. However, most cities in China have low design standards for rainwater pipe network systems and can not cope with extreme rainstorms with high return periods. Since the 1980s, with the development of remote sensing technology and geographic information system and its wide application in hydrology, significant progress has been made in urban hydrology research. Many urban hydrological models have been developed and applied in urban hydrology. The model performs urban waterlogging simulation and rainwater pipe network system analysis can provide solutions for improving urban waterlogging problems.

SWMM (storm water management model) is a dynamic precipitation-runoff simulation model, which is mainly used to simulate a single precipitation event or long-term water quantity and water quality simulation in a city. Its runoff module part comprehensively handles precipitation, runoff, and pollution load in each sub-basin. The confluence module part transmits water volume through pipe networks, channels, water storage and treatment facilities, water pumps, and regulating gates. The model can track and simulate the water quality and quantity of runoff produced by each sub-basin at any time with different time steps, as well as the flow, depth and quality of water in each pipeline and river. Likewise, the SCS model is developed by the Bureau of Water and Soil Conservation belonging to the United States Department of Agriculture in 1954. It is widely used in watershed hydrological simulations. The runoff curve number method (SCS-CN) has a simple calculation process, few parameters required, easy access to data, and consideration of the characteristics of the underlying surface of the region.

The surface runoff continuity errors of the simulation results obtained by inputting three spots of rain with different recurrence periods are all 0, and the continuity errors of flow calculation are -0.43% , -0.24% , and -0.18% , respectively. Using the comprehensive runoff coefficient method, the comprehensive runoff coefficients of the measured rainfall data are 0.658, 0.667, and 0.682 in sequence. The pipe network is analyzed; when the rain return period is 1 a, the full pipe rate of the pipe section is 4.4%, and the pipe section overload rate is 4.4%. When the rain return period is 2 a, the full pipe section rate is 24.53%, and the pipe section overload rate is 24.53%. The return period of rainfall increased to 5 years, the full pipe section rate was 33.96%, and the pipe section overload rate was 32.08%. The main influencing factors of pipeline overload are the overload of upstream and downstream pipelines, the accumulation of water at both ends, the impermeability of the surrounding catchment area and its total area. The nodes are analyzed; when the rainfall return period is 1 a, 8 nodes generate water, when the rainfall return period is 2 a, 37 nodes generate water, and when the rainfall return period is 5 a, 60 nodes generate water. The main influencing factors of node stagnant water are the impermeability of the catchment area, the CN value, the total area, and the density of the city and the pipeline network.

The model can simulate the urban rainstorm and waterlogging in Zhengzhou High-tech Zone, but the rainwater pipe network system in the high-tech zone can not well cope with the heavy rain in the design return period in the drainage code of Zhengzhou City. The overload pipe section and stagnant water of the drainage pipe network of Zhengzhou High-tech Zone have different nodes, but the two have a close positive correlation. The nodes at both ends of the overloaded pipe section are more prone to overflow, thus forming four obvious flood-prone areas.

Key words: SWMM model; runoff curve number method; pipe network overload; node overflow; urban waterlogging