文章编号:1008-1542(2018)01-0084-07　　doi:10.7535/hbkd.2018yx01011

城市内涝风险分析模型系统开发与应用

周玉文[1,2],娄富豪[1,2],刘子龙[1,3],杨伟明[1,2],刘　原[1,2],吴献平[1,2],王中昌[4]

(1.北京工业大学建筑工程学院,北京　100124; 2.北京市水质科学与水环境恢复重点实验室,北京 100124; 3.北京市城市规划设计研究院,北京　100037; 4.沧州市规划设计研究院,河北沧州 061000)

摘　要:为了全面客观评估城市排水管网的排水能力、预防城市内涝灾害的发生,基于 EPA SWMM 与 ArcEngine 技术,结合等流时线法与水量平衡原理,开发了城市内涝风险分析模型系统(USRAMS)。阐述了 USRAMS 的原理与功能,说明了利用 USRAMS 进行管网排水能力评估与内涝风险分析的方法,并验证了 USRAMS 的适用性;对沧州市进行了现状管网排水能力评估和城市内涝风险分析,以主题图的形式准确直观地表达了瓶颈管段位置以及城市内涝风险的分布情况。实例证明,USRAMS 地表产汇流模块只需径流系数与汇水时间 2 个参数,较好地适应了中国当前情况,二维地表淹水模拟采用水量平衡原理,计算稳定、快速,其模型结果可为城市内涝防治与雨水管网系统的规划改造提供一定参考。

关键词:城市给水排水工程; USRAMS;等流时线;径流系数;排水能力评估;内涝风险分析

中图分类号:TU992　　**文献标志码**:A

Development and application of urban stormwater risk analysis modeling system

ZHOU Yuwen[1,2], LOU Fuhao[1,2], LIU Zilong[1,3], YANG Weiming[1,2], LIU Yuan[1,2], WU Xianping[1,2], WANG Zhongchang[4]

(1.College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2.Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing 100124, China; 3.Beijing Municipal Institute of City Planning & Design, Beijing 100037, China; 4.Cangzhou Urban Planning & Design Institute, Cangzhou, Hebei 061000, China)

Abstract: In order to evaluate the pipeline drainage capacity and urban flood risk objectively, urban storm water risk analysis modeling system (USRAMS) is developed based on EPA SWMM and ArcEngine combined with the principle of equal flow time-line method and water balance. The principle and function of USRAMS and the method of assessing pipeline drainage capacity and urban flood risk with USRAMS are described, and the suitability of USRAMS is verified. Taking Cangzhou as an ex-

收稿日期:2017-04-24;修回日期:2017-07-09;责任编辑:王海云

基金项目:国家自然科学基金(51478016);国家水专项课题(2013ZX07304-001-2,2013ZX07304-001-3)

第一作者简介:周玉文(1952—),男,辽宁锦州人,教授,博士,主要从事给排水系统优化方面的研究。

通信作者:娄富豪。E-mail:louefuhao@163.com

周玉文,娄富豪,刘子龙,等. 城市内涝风险分析模型系统开发与应用[J].河北科技大学学报,2018,39(1):84-90.

ZHOU Yuwen,LOU Fuhao,LIU Zilong,et al. Development and application of urban stormwater risk analysis modeling system[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2018,39(1):84-90.

ample, USRAMS is used to assess the pipeline drainage capacity and urban flood risk, and the position of bottleneck pipe and the waterlogging risk distribution are expressed in thematic map accurately and directly. The facts show that USRAMS only needs two parameters, namely the runoff coefficient and the catchment time, and adapts to the current situation in china better; two-dimensional earth surface waterlogging simulation adopts hydrologic budget theory, so its calculation is stable and fast. The results of USRAMS may provide reference for urban waterlogging prevention and control and the planning and reforming of stormwater pipe network system.

Keywords: urban water supply and drainage engineering; USRAMS; isochronous stream line; runoff coefficient; drainage capacity assessment; local flooding risk analysis

中国城市内涝灾害较严重[1-3]。为应对城市内涝灾害，2013 年国务院办公厅发布了《关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知》，住建部编制了《城市排水（雨水）防涝综合规划编制大纲》，提出了使用水力模型对城市管网排水能力进行评估的要求[4-5]。2014 版《室外排水设计规范》大大提高了雨水管渠设计标准，明确提出内涝防治标准，并要求汇水面积超过 2 km^2 时采用数学模型法计算设计流量[6]。2013 年以来各地陆续开展城市排水防涝规划修编工作，而评估雨水排水管网排水能力和城市淹水风险是做好规划的基本前提。本文采用城市内涝风险分析模型系统（USRAMS），对沧州市现状雨水管网排水能力及城市内涝风险进行评估分析。

1　城市内涝风险分析模型系统开发情况

城市内涝风险分析模型系统（urban stormwater risk analysis modeling system）（简称 USRAMS）是北京工业大学给排水系统研究室开发的[7]。USRAMS 主要由一维管网模型模拟计算部分与二维地表淹水模拟计算部分组成，基于 ArcGIS 提供的嵌入式组件库 ArcEngine 进行开发。其地图数据管理平台为 ArcGIS，基础层数据库为 MicrosoftAccess[8]。USRAMS 采用目前国内常用的 SWMM 作为一维管网模型水力计算的引擎，添加了等流时线模块；二维地表漫流采用自主研发的内涝淹水计算引擎，基于路径追踪[9]以及水量平衡原理进行二维地表淹水模拟分析。软件系统基本构架如图 1 所示。USRAMS 借助 ArcGIS 进行管网模型基础数据的处理。

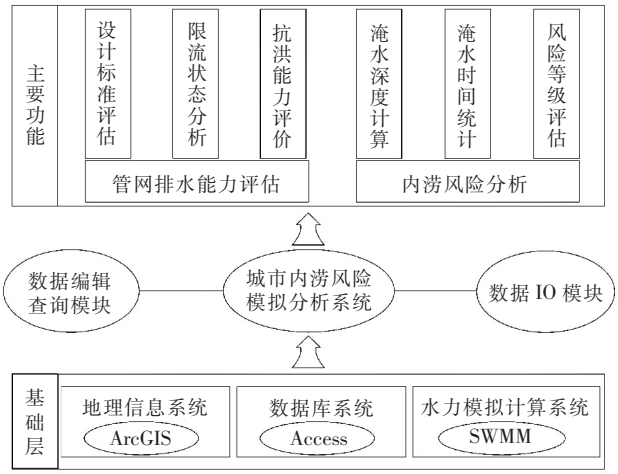


图 1　USRAMS 系统框架

Fig.1　Framework of USRAMS system

2　基本功能

USRAMS 的基本功能包括：基础数据编辑与查看（降雨数据、管网数据、汇水区数据），数据检查，上下游追踪，管网纵剖面图查看，主题图绘制，数据导出及图形的缩放、移动、查询等。

USRAMS 主要利用 ArcGIS 与 CADTableConvert 完成模型数据的处理工作，也可对模型数据进行编辑与查看。软件提供了降雨编辑器、入流编辑器、调蓄池容量编辑器、水泵性能曲线编辑器等；为保证模型数

据质量，USRAMS提供了多种数据检查功能，对管网拓扑结构关系、模型数据完整性、模型参数合理性进行检查，包括孤立点检查、管道逆坡检查、管道错位检查、节点高程检查、字段缺失检查等 。

上游追踪功能可快速选择与指定节点相连的所有上游管道并以高亮形式显示。下游追踪功能可快速选择指定节点到最下游节点之间的管道，并以高亮形式显示。通过上下游分析可以检查管网连通性及查看管道路径；通过纵剖面图绘制功能可查看管道纵剖面图，了解管道铺设情况。USRAMS可绘制多种主题图，包括管道充满度、管道超载能力、管段瓶颈状况、节点洪水量、流向、淹水分布图。软件还可以根据用户需要自定义渐变主题图。

3 模拟功能

3.1 设计降雨生成

降雨过程线是雨水管网水力模型的输入条件，它有降雨量、降雨历时、重现期、降雨峰值以及雨峰位置5个参数[10]。常见雨型主要有SCS雨型[11]、Keifer & Chu[12]雨型(芝加哥雨型)、均匀雨型、Huff[13]雨型、Yen & Chow[14]雨型(三角雨型)和24 h设计暴雨过程线[15-16]等，国内多采用120 min或180 min的芝加哥雨型。USRAMS提供芝加哥雨型生成器(如图2所示)，还可以输入实测降雨过程。

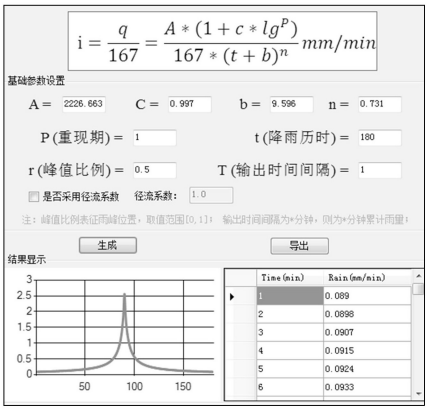


图2 芝加哥雨型生成器

Fig.2 Chicago rainfall generator

3.2 地表产汇流模型

EPA SWMM采用前损后损法与非线性水库模型进行地表产流和汇流过程模拟。此外，等流时线法、瞬时单位线法也可进行地表产汇流计算[17]。中国在进行雨水管网设计时多采用推理公式法，其主要设计参数为设计重现期、降雨历时、汇水面积和径流系数，与之相对应的计算方法为等流时线法[7]。

USRAMS在SWMM计算引擎的基础上添加了等流时线模块，其降雨-径流关系可用卷积分过程表达[18]，流量过程线为

$$Q(t_i)=\frac{\alpha F}{t_c}\sum_{j=0}^{t_c}q_{t_{i-j}}\cdot\Delta t\ , \tag{1}$$

式中：$Q(t_i)$为t_i时刻流量；F为汇水区面积；t_c为地面汇水时间，取值范围为5～15 min；$q_{t_{i-j}}$为t_{i-j}时刻地表净雨强度，当$i-j\leqslant 0$时，取$t_{i-j}=0$；α为单位换算系数，当Q，q，F和t分别以L/s，mm/min，m^2和min为单位计算时，$\alpha=60$。

3.3 一维管网模型

对于管网汇流，USRAMS采用与SWMM相同的计算方法，包括恒定流、运动波、动力波方法。USRAMS根据管道充满度绘制结果主题图，并据此评估管网排水能力，步骤如图3所示。

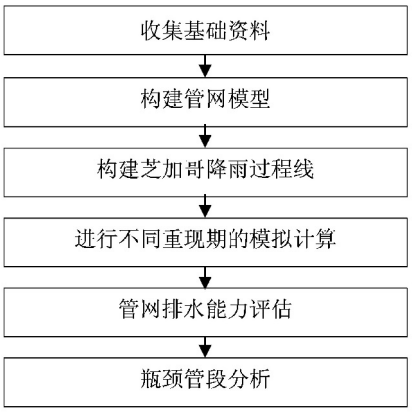


图3 管网排水能力评估步骤

Fig.3 Procedure of pipe network drainage capacity assessment

1)收集基础资料，包括管道、检查井、水泵、蓄水池、降雨等。

2)利用ArcGIS构建管网拓扑结构与模型数据库。

3)利用芝加哥雨型生成器构建降雨过程线，进行管网排水能力评估时一般选用120 min或180 min的芝加哥雨型。

4)利用动力波对一维管网模型进行模拟计算。

5)根据计算结果进行管道排水能力评估，主要指标有节点溢流情况、管道最大充满度、管段超载系数等。

6)根据管道水力状态分析产生管道超载(管道运行水面高于管顶)的原因是自身过流能力不足还是下游水位顶托。当管段发生超载时，管段存在2种水力状态如图4所示。由水力学

a) 水力坡度小于管道坡度　　b) 水力坡度大于管道坡度

图 4　管道水力状态

Fig.4　Hydraulic status of pipeline

理论可知：当超载管段属于状态 a)时，管道实际过流能力小于管道满流设计流量，发生管道超载的原因为下游水位顶托；当超载管段属于状态 b)时，管道实际过流能力大于管道满流设计流量，发生管道超载的原因为自身过流能力不足。对于受下游水位顶托影响的管段，首先考虑改善下游水力状态；对于自身过流能力不足的管段，首先考虑增大设计断面或坡度。因此，将水力状态属于状态 b)的超载管段定义为瓶颈管段。

3.4　二维地表淹水模拟计算

USRAMS 利用城市数字地形模型(DEM)，基于路径追踪算法划分排水流域，根据水量平衡原理进行二维地表淹水模拟计算，得到积水深度、积水量、积水时间等结果[7]，将最大淹水结果、淹水时间与风险等级以.asc 格式文件输出。风险等级根据淹水深度与淹水时间按表 1 进行划分。淹水深度与淹水时间的阈值可根据需要设定。

表 1　风险等级划分

Tab.1　Classification of risk levels

淹水深度/m	淹水时间/min	风险等级
$0.15 \leqslant h < 0.5$	$0 < t < 30$	低
$0.15 \leqslant h < 0.5$	$t \geqslant 30$	中
$h \geqslant 0.5$	$t > 0$	高

输出的.asc 格式文件可利用 ArcGIS 进行渲染，制作最大淹水深度、淹水时间与风险等级主题图。城市内涝风险评估时其主要步骤如图 5 所示。

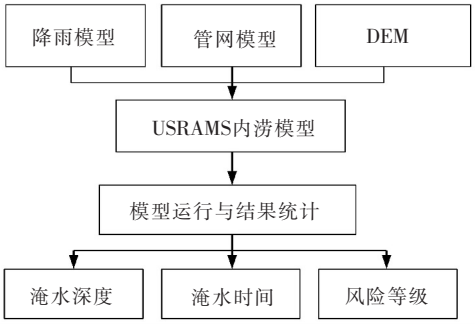


图 5　USRAMS 内涝模型构建流程

Fig.5　Construction process of USRAMS local flood model

1)构建降雨模型、管网模型、数字高程模型。暴雨可采用当地发生过的较有代表性的大暴雨历程，或根据当地的典型雨型通过同频率放大或同倍比法求得[19]。

2)搭建 USRAMS 内涝淹水模型。

3)运行模型得到最大淹水深度、淹水时间与风险等级，并输出为.asc 格式文件。

4)制作淹水深度、淹水时间、风险等级图。

4　实例研究

4.1　研究区域概况

研究区域为河北省沧州市，京杭大运河由南至北穿过市区，将沧州市分为运东和运西两大排水区[20]。沧州市现状排水管网长 307.5 km，汇水区面积为 78.6 km^2，设计重现期大部分在 0.5 a 以下。城区地势西高东低，地面平坦。城区综合径流系数为 0.6，地表汇水时间为 15 min。沧州市地形分布如图 6 所示。

4.2　现状管网排水能力分析

1)收集并输入降雨、管网资料，构建一维管网模型，对数据进行检查。

2)结合沧州市暴雨强度公式(见式(2))生成芝加哥雨型。

$$q = \frac{2\ 226.663(1 + 0.997 \lg P)}{(t + 9.596)^{0.731}}, \tag{2}$$

式(2)中，取雨峰系数 $r = 0.5$，降雨历时取 120 min，分别生成重现期为 0.5，1，2，3 a 的芝加哥雨型，其中重现期为 3 a 的芝加哥雨型如图 7 所示。

图6 数字高程模型(DEM)

Fig.6 Digital elevation model (DEM)

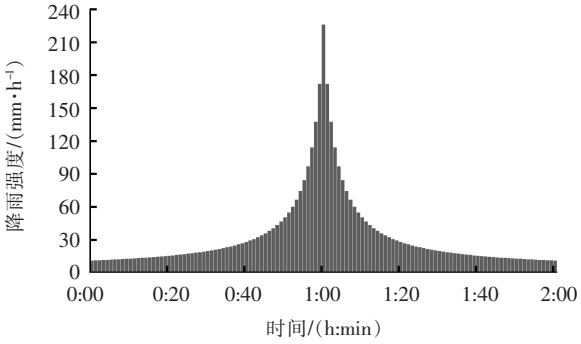
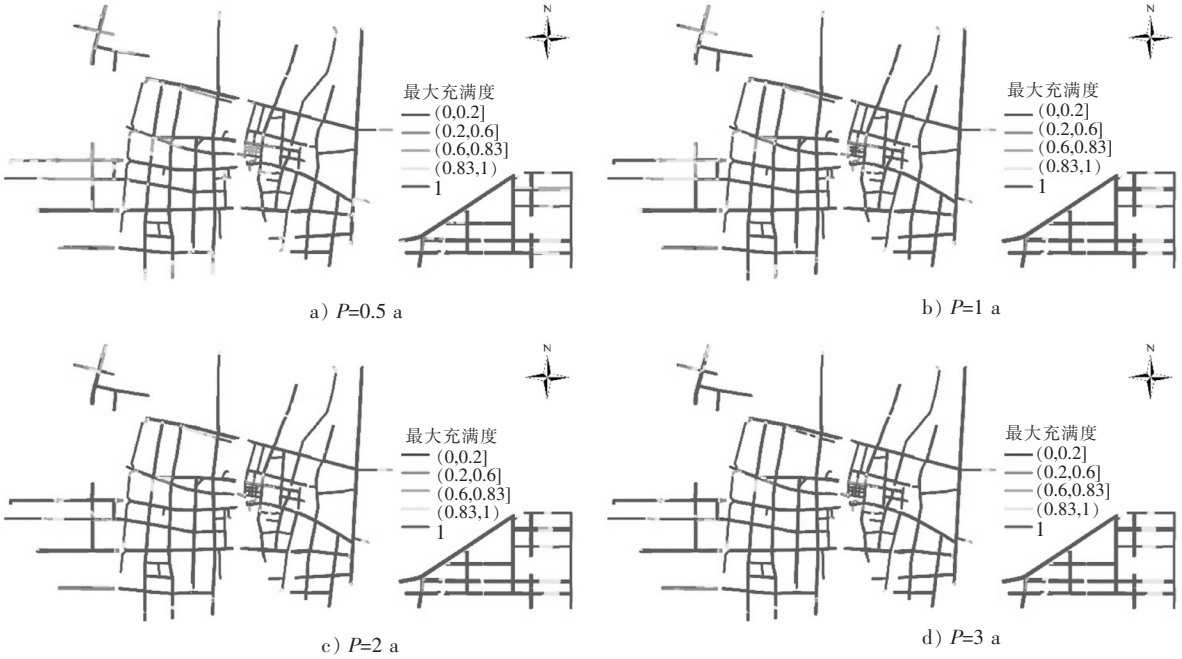


图7 $P=3$ a 芝加哥雨型

Fig.7 Chicago rainfall pattern($P=3$ a)

3)分别进行重现期0.5,1,2,3 a情景下的降雨排水模拟计算,地表产汇流模型选择等流时线法,管网汇流模型选择动力波法,模拟时间取2 h,时间步长取1 s。根据模型结果得到管网最大充满度,并绘制最大充满度结果主题图(如图8所示)。



a) P=0.5 a b) P=1 a

c) P=2 a d) P=3 a

图8 不同重现期管段最大充满度结果

Fig.8 Results of maximum pipeline depth ratio with different return period

由图8可知,随着重现期的提高,充满度为1的管段数量增加。统计重现期为<0.5,0.5～1,1～2,2～3,≥3 a管道未充满的长度,见表2。

表2 各标准区间管道长度和比例统计

Tab.2 Statistics of pipelength and ratio in different standards range

标准区间管道	管段标准/a				
	$P<0.5$	$0.5\leqslant P<1$	$1\leqslant P<2$	$2\leqslant P<3$	$P\geqslant 3$
长度/km	249.7	20.3	10.7	3.2	21.9
所占比例/%	81.7	6.6	3.5	1.0	7.2

由表2和图9可知,大部分管道的排水标准都在0.5 a以下,且主要分布在老城区;运西新区的管道标准普遍高于老城区,即沧州市老城区管道排水重现期多在0.5 a以下。沧州市规划管网设计标准要提高到三年一遇,则现状管道中有92.8%未达到标准。对于管道产生超载的原因需进一步分析。

4.3　瓶颈管段分析

正如第 3.3 小节中所述，管道发生超载的原因有 2 种，分别为管道自身过流能力不足与受下游水位顶托影响。根据模型结果，USRAMS 将管道分为 3 种类型，分别为未超载、瓶颈管段、受顶托管段。其中，瓶颈管段定义为管道超载时，管道最大水力坡度大于等于管道坡度；受顶托管段定义为管道超载时，管道最大水力坡度小于管道坡度。以 1 a 重现期模型情景为例，其瓶颈管段分布情况如图 10 所示。

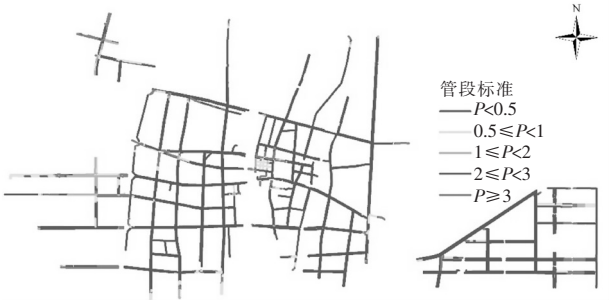


图 9　管网排水能力标准分布图

Fig.9　Layout of pipe network drainage capacity standard

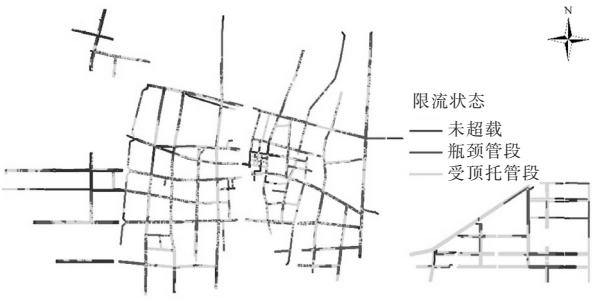


图 10　瓶颈管段分布情况

Fig.10　Layout of bottleneck pipeline

通过 USRAMS 明确了管道超载的原因，并通过主题图展示了瓶颈管段与受顶托管段的分布情况，为进一步的管网改造与规划提供参考。

4.4　现状内涝风险评估

USRAMS 城市内涝模型的 DEM 的精度为 10 m×10 m。选取一场 24 h 典型实测降雨进行风险评估，降雨记录时间间隔为 5 min，总雨量为 196.4 mm，降雨过程线如图 11 所示。

产汇流模型选用等流时线法，一维管网汇流模型选用动力波法，时间步长取 1 s，地表水量平衡计算步长采用 1 min，报告步长取 5 min。根据模型计算结果，将淹水深度输出为.asc 格式文件，利用内涝淹水结果统计工具统计得到淹水时间与风险等级并输出为.asc 格式文件。最后利用 ArcGIS 分别制作最大淹水深度、最大淹水时间、风险等级主题图，如图 12—图 14 所示。

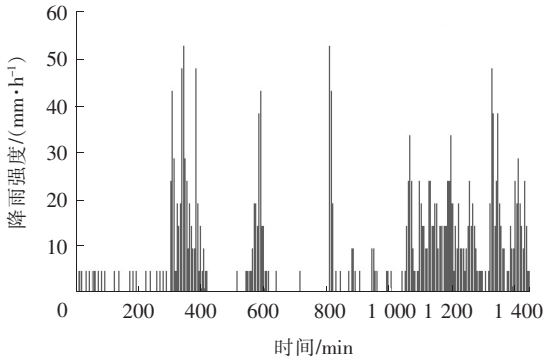


图 11　24 h 实测降雨过程线

Fig.11　Measured rainfall process line of 24 hours

图 12　最大淹水深度主题图

Fig.12　Theme map of maximum water depth

图 13　最大淹水时间主题图

Fig.13　Theme map of maximum flooding time

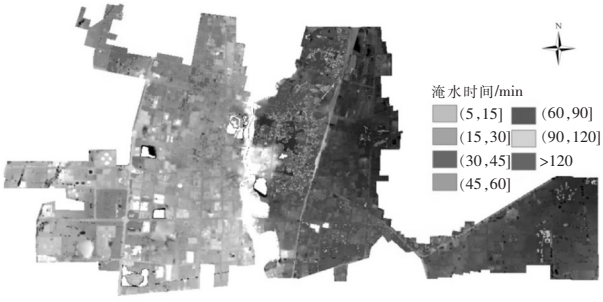


图 14　风险等级主题图

Fig.14　Theme map of risk level

对于风险等级为中和高的区域，应尽快采取措施加以治理，主要措施有管网改造、增建泵站、源头控制(LID)、增加地表排水通道等。

5 结 语

USRAMS 软件在 SWMM 计算引擎的基础上添加了等流时线模块，通过二维地表淹水模拟可计算得到淹水深度、淹水时间以及内涝风险等级的分布情况，在此过程计算中采用水量平衡原理，加快了计算速度，且具有良好的稳定性。总之，USRAMS 软件可为内涝治理措施的制定与管网系统的规划设计提供参考。

目前，国内主流的模型软件主要有 MIKE URBAN，Inforworks，PCSWMM 等，都集成或开发了独立的 LID 模块，而 USRAMS 的针对性较强，主要用于城市雨水管网排水能力评估与城市内涝风险分析，系统中并未集成 LID 模块，但 USRAMS 参数需求少，地表产汇流模型只需径流系数与汇水时间 2 个参数，并且二维地表淹水模拟计算速度均优于上述软件。为了更好地适应中国海绵城市建设与内涝防治工作，USRAMS 将逐步集成 LID、大排水系统设计等模块。

参考文献/References：

[1] 侯玉栋，李树平，周巍巍，等. 2011 年国内媒体报道城市暴雨事件分析[J]. 给水排水，2012，38(sup)：44-49.
HOU Yudong，LI Shuping，ZHOU Weiwei，et al. Analysis of Chinese media reports on urban storm events in 2011[J]. Water & Wastewater Engineering，2012，38(sup)：44-49.

[2] 王军，马洪涛. 城市排涝规划有关问题探讨[J]. 给水排水，2014，40(3)：9-12.
WANG Jun，MA Hongtao. Discussion on some issues about urban logging prevention planning[J]. Water & Wastewater Engineering，2014，40(3)：9-12.

[3] 周玉文. 城市排水(雨水)防涝工程的系统架构[J]. 给水排水，2015，41(12)：1-5.
ZHOU Yuwen.System architecture of waterlogging prevention on water drainage (rainwater)system[J]. Water & Wastewater Engineering，2015，41(12)：1-5.

[4] 谢映霞. 排水防涝 重任在肩——写给《城市排水(雨水)防涝综合规划编制大纲》颁布一周年[J]. 给水排水，2014，40(6)：1-3.
XIE Yingxia. Drainage and waterlogging prevention，heavy burden on shoulder——for the anniversary of "City drainage (rainwater)and waterlogging prevention program outline" [J]. Water & Wastewater Engineering，2014，40(6)：1-3.

[5] 车伍，葛裕坤，唐磊，等.我国城市排水(雨水)防涝综合规划剖析[J]. 中国给水排水，2016，32(10)：15-21.
CHE Wu，GE Yukun，TANG Lei，et al. Analysis of integrated plan for urban drainage (stormwater) and flood control[J].China Water & Wastewater，2016，32(10)：15-21.

[6] GB 50014—2006，室外排水设计规范[S].

[7] 刘子龙. 基于模型的城市内涝灾害防治理论与技术研究[D]. 北京：北京工业大学，2015.
LIU Zilong. The Model-Based Techniques and Theories for Urban Local Flooding Prevention [D]. Beijing：Beijing University of Technology，2015.

[8] 姚宇. 基于 GeoDatabase 的城市排水管网建模的应用研究[D]. 上海：同济大学，2007.
YAO Yu. Study on The Application of Urban Drainage Networks Modeling Based on GeoDatabase[D].Shanghai：Tongji University，2007.

[9] MAKSIMOVIĆ Č，PRODANOVIĆ D，BOONYA-AROONNET S，et al. Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding[J]. Journal of Hydraulic Research，2009，47(4)：512-523.

[10] 高琳. 郑州市排水防涝系统设计降雨研究[D]. 北京：北京工业大学，2016.
GAO Lin. Research on the Design Rainfall of Urban Drainage and Flooding Prevention System in Zhengzhou[D]. Beijing：Beijing University of Technology，2016.

[11] REILLY J，PIECHOTA T C. Actual storm events outperform synthetic design storms：A review of SCS curve number reliability[C]// Proceedings of World & Environmental Resources Congress 2005.Washington D C：American Society of Civil Engineers，2005：456-463.

[12] KEIFER C J，CHU H H. Synthetic storm pattern for drainage design[J]. Journal of the Hydraulics Division，1957，83(4)：1-25.

[13] HUFF F A. Time distributions of heavy rainstorms in Illinois[J]. Water Resources Research，1967，3(4)：1007-1019.

[14] YEN B C，CHOW V T. Design hyetographs for small drainage structures[J]. Journal of the Hydraulics Division，1980，106(6)：1055-1076.

[15] 周玉文，高琳，杨伟明，等. 基于水利雨型峰值的城市长历时设计暴雨雨型制作方法[P].中国专利：CN201510781439.7，2016-03-23.

[16] 朱勇年. 设计暴雨雨型的选用——以杭州市为例[J]. 中国给水排水，2016，32(1)：94-96.
ZHU Yongnian. Selection of design rainfall pattern：Case of Hangzhou[J].China Water & Wastewater，2016，32(1)：94-96.

[17] 周玉文，孟昭鲁，宋军. 城市雨水管网非线性运动波法模拟技术[J]. 给水排水，1995，21(4)：9-11.
ZHOU Yuwen，MENG Zhaolu，SONG Jun.Simulation of urban storm sewer system by non-linear kinematic wave method[J]. Water & Wastewater Engineering，1995，21(4)：9-11.

[18] 周玉文，孟昭鲁. 城市雨水口流域等流时线法降雨径流模拟模型[J]. 沈阳建筑工程学院学报，1994，10(4)：339-344.
ZHOU Yuwen，MENG Zhaolu. Precipitation runoff simulation modeling by isochronal method for urban inlet basin watershed[J].Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute，1994，10(4)：339-344.

[19] GB 51222—2017，城镇内涝防治技术规范[S].

[20] 周劲松. 城市总体规划中的城市特色塑造——以沧州市城市总体规划为例[J]. 中华建设，2011，20(4)：74-75.
ZHOU Jinsong. Urbanization in urban master planning：A case study of Cangzhou city's master plan[J].China Construction，2011，20(4)：74-75.