

# 基于GIS淹没模型的城市道路内涝灾害风险区划研究

叶丽梅<sup>1</sup>, 周月华<sup>1</sup>, 向 华<sup>1</sup>, 牛 奔<sup>2,3</sup>, 高 伟<sup>4</sup>, 周 羽<sup>5</sup>

(1. 武汉区域气候中心, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉中心气象台, 湖北 武汉430074;  
3. 湖北省仙桃市气象局, 湖北 仙桃 433000; 4. 中国地质大学信息工程学院, 湖北 武汉 430074;  
5. 湖北省襄阳市气象局, 湖北 襄阳 441021)

**摘 要:** 在求取襄阳中心城区重现期雨量与可抽排雨量的基础上, 采用基于GIS暴雨洪涝淹没模型计算不同重现期致灾雨量的淹没水深和范围; 依据城市内涝对道路的实际影响, 制作城市道路内涝灾害风险区划图。结果表明, 该方法能够直观表达研究区域内不同雨量阈值的内涝灾害淹没风险分布, 定量评估淹没水深、淹没范围。同时给出了城市道路内涝灾害风险区划图, 结合城市道路信息, 准确定位高风险易涝街区, 为政府部门决策提供科学依据。

**关键词:** 淹没模型; 城市内涝; 风险区划

中图分类号: x43

文献标识码: A

文章编号: 1004-8227(2016)06-1002-07

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201606018

城市是政治、经济和文化中心, 人口密集, 工商业发达, 财富集中, 一旦遭受洪灾, 将造成政治影响和经济损失, 因此探讨城市内涝淹没风险显得十分重要。近年来, 随着计算机的发展, 发达国家提出了如SWMM、STORM、MOUSE、MIKE和Wallingford Model等城市暴雨径流模型, 在国外暴雨径流方面的研究中得到了广泛的应用<sup>[1~3]</sup>。国内的学者虽然自主构建了一些城市内涝模型<sup>[4, 5]</sup>, 但多数还是基于国外的模型本地化运用<sup>[6, 7]</sup>, 而且主要是对城市内涝灾害风险分析, 而对于不同暴雨重现期下的暴雨风险评估和内涝灾害风险区划的研究相对薄弱。2011~2012年在中国气象局现代气候业务试点项目支持下, 武汉区域气候中心、中国地质大学联合开发了“暴雨洪涝淹没模型”<sup>[8]</sup>, 该淹没模型在2011~2015年汛期得到多次实例检验, 可运用于灾害评估<sup>[9~11]</sup>, 并取得了较好的效果。本文利用暴雨洪涝淹没模型输出的淹没水深数据, 绘制城市内涝淹没风险图, 同时结合承灾体脆弱性指标与分布数据, 制作承灾体的城市内涝灾害风险区划图, 为政府决策、实时灾害风险评估、灾害防御规划及其防御工程的建设提

供更准确的资料。

## 1 研究区域和资料

### 1.1 研究区概况

襄阳位于湖北省西北部, 汉江中游平原腹地, 是省辖市、省域副中心城市, 城区面积仅次于武汉的第二大城市。襄阳主要灾害以暴雨洪涝为首, 发生次数最多, 占全部灾害记录的37.6%; 从直接经济损失看, 暴雨洪涝所占的比例也是最大的, 占全部气象灾害损失的51.9%<sup>①</sup>。

襄阳市城区位于东经112°00′~112°14′, 北纬31°54′~32°10′, 东西最大横距21 km(西起隆中严寺最西端, 东至三董水库), 南北最大纵距29 km(南起永丰水库, 北至叶家店北1km), 包含樊城区、襄城区, 面积212.7 km<sup>2</sup>。中心城区位于东经112°02′~112°03′, 北纬32°00′~32°02′, 面积63.3 km<sup>2</sup>, 本文的城市道路内涝风险评估以中心城区为主要研究区域。

### 1.2 研究资料

(1)地理信息数据: 襄阳城区的矢量边界数

收稿日期: 2015-09-28; 修回日期: 2016-01-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划) (2013CB430206)[National Key Based Research Program of China](2013CB430206)[973 National Science and Technology Program]; 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306056) [Public Service Sectors (Meteorology) Research Projects] 湖北省气象局科技课题(2015 & 02) [Science and technology Project of Hubei Meteorology Bureau (2015 & 02)]

作者简介: 叶丽梅(1985~), 女, 工程师, 主要从事气象灾害评估研究。E-mail: ylm\_nb@163.com

①武汉区域气候中心. 襄阳市城市气候影响评估报告. 2014

据,来源湖北省气象局;襄阳城区1:5万DEM和河网地理信息数据,来源中国气象局;襄阳中心城区的30 m地表覆盖数据产品,来源国家基础地理信息中心;襄阳中心城区街区道路数据,来源襄阳市规划局。

(2)气象观测数据:襄阳区域加密气象站2006~2012年的逐小时、逐日的降水量数据,来源湖北省气象局。

(3)城市管网数据:襄阳城区泵站现状抽排水量、泵站汇水面积、排水管网流向、城区易涝街道数据,均来源襄阳市政排水处。

## 2 研究方法

### 2.1 方法流程

基于襄阳城区区域加密气象站历史逐时降水数据,利用广义帕累托分布法(Generalized Pareto Distribution,简称GPD)<sup>[12,13]</sup>计算各站不同重现期小时雨量,同时考虑城市的抽排能力,即通过泵站的现状抽排水量与汇水面积数据换算成小时排水量,进而求取不同重现期情景下城市内涝的致灾雨量;然后将致灾雨量输入暴雨洪涝淹没模型中,输出不同重现期阈值的淹没范围、水深;最后结合城市道路内涝灾害脆弱性指标及城市街区道路数据,给出襄阳中心城区道路的内涝高风险区(图1)。

### 2.2 暴雨洪涝淹没模型

#### 2.2.1 基本原理<sup>[14,15]</sup>

淹没模型基本原理是基于GIS栅格数据的二维水动力学暴雨洪涝演进模型,利用圣维南方程组的扩散波近似值来表示,具体公式<sup>[15]</sup>如下所示:

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

上式中,

$$U = \begin{pmatrix} h \\ 0 \end{pmatrix} F = \begin{pmatrix} uh \\ h \end{pmatrix} G = \begin{pmatrix} r-f \\ S_0-S_f \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $h$ 为水深( $L$ ); $u$ 为平均流速( $LT^{-1}$ ); $x$ 为距离( $L$ ); $t$ 为时间( $T$ ); $r$ 为降雨速度( $LT^{-1}$ ); $f$ 为下渗速度( $LT^{-1}$ ); $S_0$ 为地面比降; $S_f$ 为摩擦比降。

为了解决连续性方程中有关单元网格水流的流入和流出以及网格单元的体积变化,根据曼宁

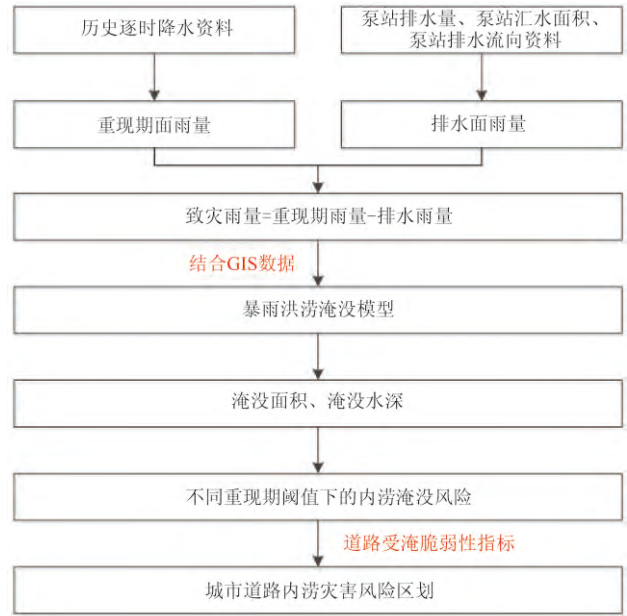


图1 城市道路内涝灾害风险区划制作流程图

Fig.1 Flow Chart of Waterlogging Flood Risk Distribution of Urban Roads

公式<sup>[16]</sup>计算各个方向的动量方程。由实际的土地利用情况<sup>[9]</sup>,将土地利用类型分8大类,分别为水域、水田、草地、旱地、林地、居民地、城市工业用地、未用地,其曼宁值分别赋予33、25、20、20、10、6、5、25<sup>[9,17]</sup>。

#### 2.2.2 致灾雨量的确定

致灾临界雨量是指可能造成暴雨洪涝灾害的致灾因子量值,超过致灾临界雨量的雨量即为致灾雨量,是暴雨洪涝淹没模型重要参数之一。在城区中当降雨量超过排水量与下渗量之和时,地表产生径流而造成积水淹没。城市用地根据类型的不同,可分为透水、不透水两部分,两者下渗量不同。从襄阳中心城区土地利用类型数据可知,中心城区以人造表面用地为主,占总面积的93.5%,而耕地、林地、草地等透水用地一共只占4.5%,其余部分为湿地和水体(图2)。由于研究区域的透水地面占极少数,为了简化模型,在此忽略下渗项,给出致灾雨量的计算公式,如下:

$$R_{\text{致灾雨量}} = C - X \quad (3)$$

式中: $R_{\text{致灾雨量}}$ 为实际用于计算襄阳中心城区淹没面积的致灾雨量; $C$ 为降雨量; $X$ 为可抽排雨量。

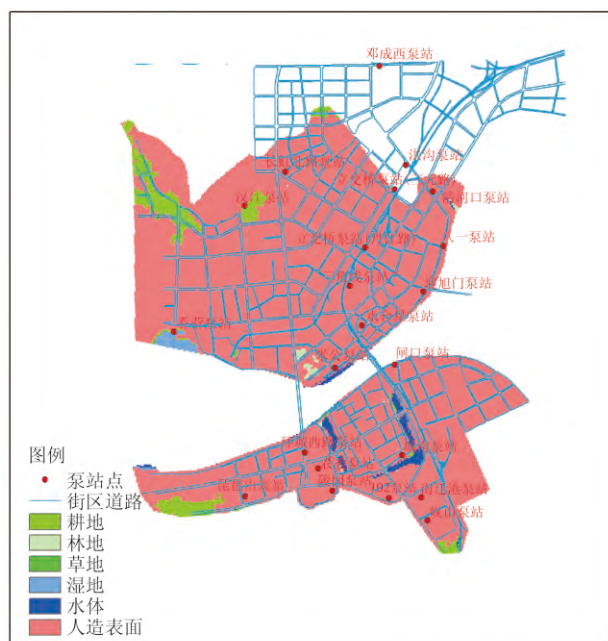


图2 襄阳中心城区土地利用类型分布图

Fig.2 Land Use of Xiangyang Center City

### 3 结果分析

#### 3.1 襄阳城区不同重现期雨量

本文采用广义帕累托分布法计算襄阳城区区域加密自动站的10年、20年、30年、50年、100年一遇重现期小时降水量。广义帕累托分布在模拟极端降水事件,推算一定重现期的极端降水量上具有更高精度的实用性和稳定性,该方法基本不受原始序列样本量的影响,具有全部取值域的高精度稳定拟合<sup>[12, 13, 18, 19]</sup>。考虑参数估计的精确性和简便性,采用基于概率加权矩(PWM)的L矩估计方法计算其分布参数。通过Hill图,选取图中尾指数稳定区域起始点对应的横坐标值为门限值,利用柯尔莫哥洛夫检验对GPD模型参数估计效果进行了检验,结果表明其通过了信度为0.05的信度检验。

为了直观表现雨量的分布特征,运用GIS工具,使用反距离权重插值法,利用襄阳22个区域自动站(站点空间分布均匀)的重现期小时雨量进行空间插值(图3,其他重现期雨量图略),中心城区10年一遇小时雨量大部在24~30 mm,空间上呈东多西少分布。

#### 3.2 城区排雨量计算

当强降水或连续性降水超过城市排水能力时,城市内出现积水产生内涝。城市排水能力是

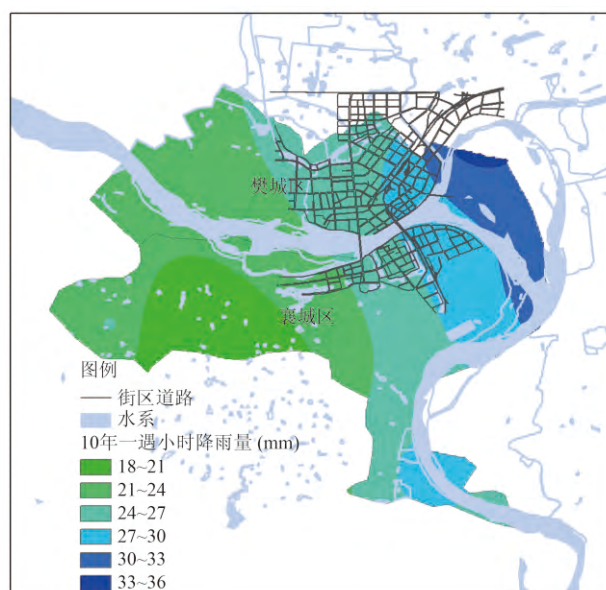


图3 襄阳城区10年一遇小时降雨量分布图(单位: mm)

Fig.3 Precipitation Distribution of 10 years-hour in Xiangyang City (unit: mm)

影响城市内涝的另一个重要因素。依据城市排水管网流向数据,划分各泵站的汇水范围,并利用公式(4),由襄阳市政排水处提供的襄阳城区各泵站现状抽排量和汇水面积数据,计算出各汇水面的小时排雨量(图4)。

$$X = V/S \times 0.001 \times 3600 \quad (4)$$

式中:  $X$ 为小时排雨量(mm/h);  $V$ 为抽排量

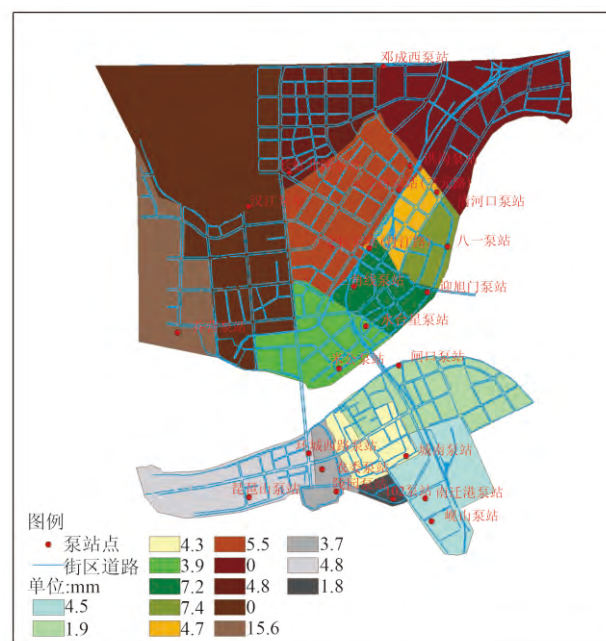


图4 襄阳中心城区小时排雨量分布图(单位: mm)

Fig.4 Drainage Hour Rainfall Distribution of Xiangyang Center City (unit: mm)



( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $S$ 为汇水面积( $\text{km}^2$ )。

### 3.3 不同重现期降水淹没风险

基于暴雨洪涝淹没模型,使用不同重现期的致灾雨量计算襄阳城区淹没范围和淹没水深(图5,其他时段重现期的淹没水深分布图略)。由图可见,随着面雨量的增大,淹没水深和淹没范围也在不断的加深、加大。不同重现期的淹没水深空间分布特征基本一致,即淹没水深大部在0.2 m以下,淹没水深大于0.2 m主要分布在襄城区西部及南部、樊城区中北部地区及境内河流两岸低洼地区。

### 3.4 城市道路内涝灾害风险区划

由于不同承灾体的耐淹脆弱性指标不同,本文重点研究针对城市道路交通的内涝灾害风险。根据内涝对道路产生的实际影响,并参考已有划分标准<sup>[20]</sup>,将城市道路内涝划分为四个风险等级:①低风险区:水深在5 cm以下,基本无积涝;②次低风险:水深在5~20 cm之间,轻度积

涝,路面有积水,但对交通影响不大;③次高风险:路面积水在20~40 cm之间,中度积涝,行人行走困难,交通受到明显影响;④高风险:路面积水在40 cm以上,重度涝灾,车辆熄火、交通堵塞,道路两旁的商店和居民家庭也受到严重影响。由襄阳中心城区城市道路内涝脆弱性指标与淹没水深数据,划分不同重现期雨量情景下的道路内涝灾害风险区划图。图中显示,不同重现期雨量下,襄城区西部及南部、樊城区中北部地区及境内河流两岸低洼地区都是城市道路内涝高风险区域,该区域内道路达到重度内涝标准。另外,随着雨量的增大,高风险区域的范围也是增大的。

将襄阳中心城区道路分布信息分别与城市内涝灾害风险分布数据进行叠加分析,提取不同重现期情景的道路淹没长度(图6)。从中可见,对于不同重现期雨量,道路的淹没水深大部均在5 cm以下,其次是40 cm以上,5~40 cm水深段的道

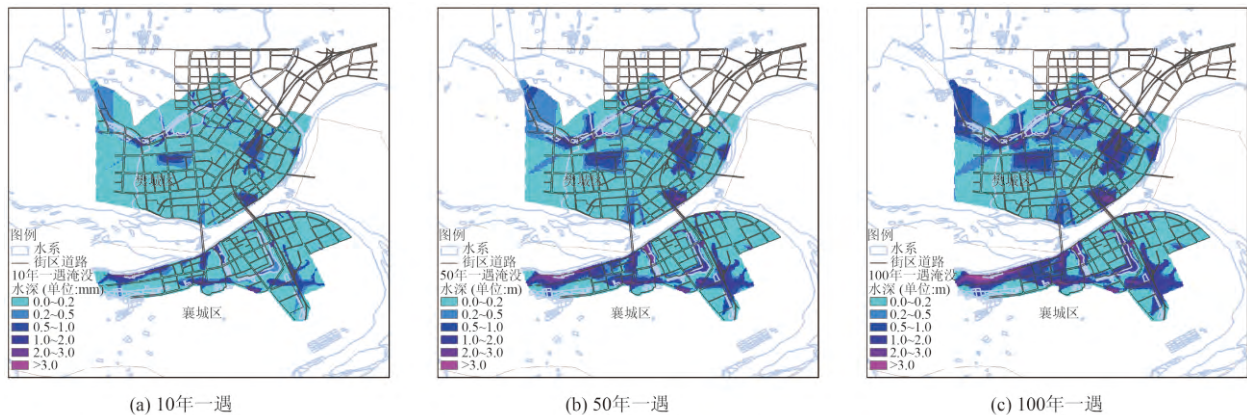


图5 襄阳中心城区不同重现期降水量内涝淹没水深分布图(单位: m)((a): 10年一遇; (b)50年一遇; (c)100年一遇)

Fig.5 Waterlogging Submerged Depth of Different Return Period in Xiangyang Center City (unit: m) ((a): 10 years; (b): 50 years; (c): 100 year)

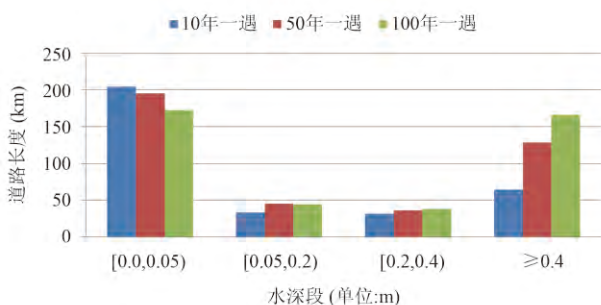


图6 不同重现期情景下襄阳中心城区不同水深段道路长度(单位: km)

Fig.6 Road Length for Depth Sections of Different Return Period in Xiangyang Center City (unit: km)

路长度最小。随着重现期雨量的增加,小于5 cm水深段的道路长度随着雨量的增加而减小,大于5 cm水深段的道路长度是增加的,其中大于40 cm长度增加明显。即高风险道路随着雨量值的增加,风险范围是扩大的。

### 3.5 城市道路内涝灾害风险区划检验

为了验证城市道路内涝灾害风险区划的准确性,利用不同重现期雨量下的受淹街区,与市政排水处提供的襄阳市中心城区积水点进行对比分析(图7)。定义出现大于5cm水深的街区道路与中心城区积水点有重合区域,即模拟结果与实际情

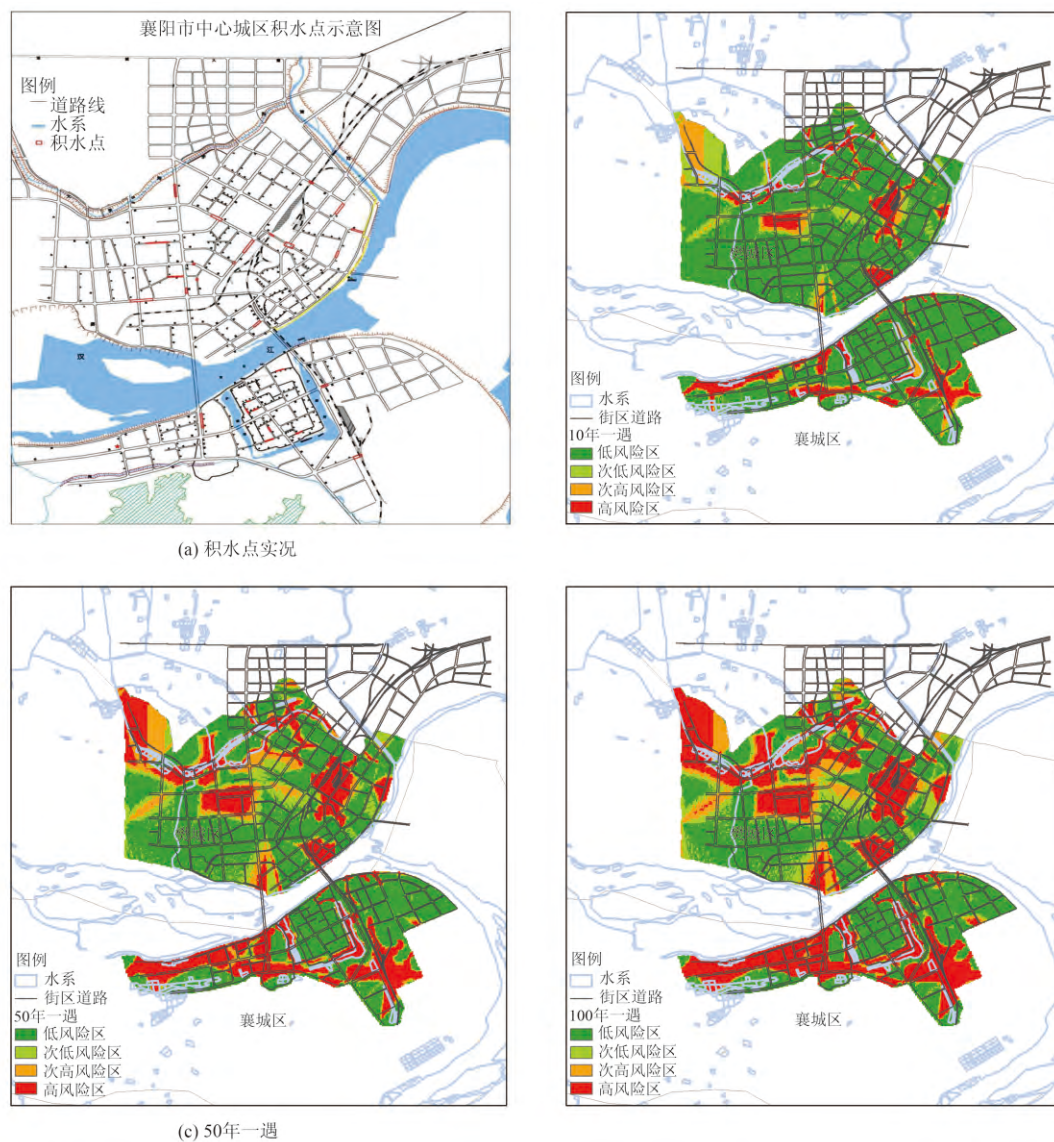


图 7 不同重现期情景下襄阳中心城区道路内涝风险区划图

Fig.7 Waterlogging Risk Regionalization of Different Return Period in Xiangyang Center City Roads (unit: km)((a): water points; (b): 10 years; (c): 50 years; (d)100 year)

况匹配。模拟检验定量评估使用匹配率来衡量，计算公式如下：

$$MAT = \frac{N_m}{N_s} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $MAT$ 为匹配率； $N_m$ 为模拟点与实际点的重合数； $N_s$ 为收集到的实际积水点总数。结果可见：10年一遇、50年一遇、100年一遇的街区道路积水点匹配率分别为52%、78%、81%。模拟的受淹街区与中心城区积水点存在一定的差异，一是因为人工改造造成地形数据失真，二是本文采用的是1：5万的地形数据，反应不出涵洞、小巷等

此类精细地形地貌。

## 4 总结与讨论

(1)本文运用暴雨洪涝淹没模型，给出了襄阳中心城区不同重现期雨量阈值的淹没水深空间分布，直观的反映了襄城区西部及南部、樊城区中北部地区及境内河流两岸低洼地区是淹没高风险区域，结合气象台预报预警信息，可定量评估淹没高风险分布。

(2)考虑城市内涝对道路产生的实际影响，结合街区道路的空间分布数据，绘制城市道路内涝

灾害风险区划图,为城市交通预警服务、建设街区道路风险回避提供有力的科学依据。

(3)城市排水管网是个复杂的系统,随着城市迅速发展,管网受人工干预影响大,排水能力处于不断的变化中,加之很难获取到高分辨率的城市地形数据,一定程度上影响了淹没模拟精度。

(4)将二维水动力模型与风险理论相结合,选择城市道路交通承灾体进行了有益的探索,为小尺度风险区划研究提供了一种新思路。但是风险因素众多,本研究仅考虑积水深度,而未考虑积水历时、车速和车流、以及道路行人以及交通流等因素,建议在以后的工作中进一步完善。

致谢:湖北襄阳市市政排水处、襄阳市规划局提供了有益的数据,谨致谢忱

## 参考文献:

- [1] FRENÍ G, MAGLIONICO M, DI FEDERICO V. State of the art in Urban drainage modeling[R]. CARE-S Report D7, 2003: 9–170.
- [2] JANG S, CHO M, YOON J, et al. Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment[J]. Desalination, 2007, 212(1/3): 344–356.
- [3] LEE S B, YOON C G, JUNG K W, et al. Comparative evaluation of runoff and water quality using HSPF and SWMM[J]. Water Science and Technology, 2010, 62(6): 1401–1409.
- [4] 李娜,仇劲卫,程晓陶,等.天津市城区暴雨涝仿真模拟系统的研究[J].自然灾害学报, 2002, 11(2): 112–118.  
【LI N, CHOU J W, CHENG X T, et al. Study on simulation system of rainstorm waterlogging in Tianjin City[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(2): 112–118.】
- [5] 解以扬,韩素芹,由立宏,等.天津市暴雨内涝灾害风险分析[J].气象科学, 2004, 24(3): 342–349.  
【XIE Y Y, HAN S Q, YOU L H, et al. Risk analysis of urban rainfall waterlogging in Tianjin City[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2004, 24(3): 342–349.】
- [6] 贺法法,陈晓丽,张雅杰,等. GIS辅助的内涝灾害风险评价——以豹澥社区为例[J].测绘地理信息, 2015, 40(2): 35–39.  
【HE F F, CHEN X L, ZHANG Y J, et al. GIS-aided risk assessment of waterlogging disasters in Baoxie community[J]. Journal of Geomatics, 2005, 40(2): 35–39.】
- [7] 陈明辉,黄培培,吴非,等.基于GIS和RS的水力模型构建与多情景分析[J].测绘通报, 2014(6): 29–33, 38.  
【CHEN M H, HUANG P P, WU F, et al. Hydraulic model construction and scenario analysis based on GIS and RS[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(6): 29–33, 38.】
- [8] 章国材编著.暴雨洪涝预报与风险评估[M].北京:气象出版社, 2012: 119–125.
- [9] 叶丽梅,周月华,李兰,等.通城县一次暴雨洪涝淹没个例的模拟与检验[J].气象, 2013, 39(6): 699–703.  
【YE L M, ZHOU Y H, LI L, et al. Simulation and test of rainstorm and flood inundation in Tongcheng county[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(6): 699–703.】
- [10] 史瑞琴,刘宁,李兰,等.暴雨洪涝淹没模型在洪灾损失评估中的应用[J].暴雨灾害, 2013, 32(4): 379–384.  
【SHI R Q, LIU N, LI L, et al. Application of rainstorm and flood inundation model in flood disaster economic loss evaluation[J]. Torrential Rain and Disasters, 2013, 32(4): 379–384.】
- [11] 李兰,周月华,叶丽梅,等.基于GIS淹没模型的流域暴雨洪涝风险区划方法[J].气象, 2013, 39(1): 112–117.  
【LI L, ZHOU Y H, YE L M, et al. Basin rainstorm flood risk regionalization method based on GIS rainstorm flood inundation model[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(1): 112–117.】
- [12] 王芳,门慧.三参数广义帕累托分布的似然矩估计[J].数学年刊A辑(中文版), 2013, 34(3): 299–312.  
【WANG F, MEN H. Likelihood moment estimation for the three-parameter generalized Pareto distribution[J]. Chinese Annals of Mathematics, 2013, 34(3): 299–312.】
- [13] 欧阳资生,龚曙明.广义帕累托分布模型:风险管理的工具[J].财经理论与实践(双月刊), 2005, 26(5): 88–92.  
【OUYANG Z S, GONG S M. GPD model as a risk management tool[J]. The Theory and Practice of Finance and Economics, 2005, 26(5): 88–92.】
- [14] BATES P D, HORRITT M S, FEWRELL T J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling[J]. Journal of Hydrology, 2010, 387(1/2): 33–45.
- [15] ZHENG N S, TACHIKAWA Y, TAKARA K. A distributed flood inundation model integrating with rainfall-runoff processes using GIS and remote sensing data[C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37(B4): 1513–1518.
- [16] 贾界峰,赵井卫,陈客贤.曼宁公式及其误差分析[J].山西建筑, 2010, 36(7): 313–314.  
【JIA J F, ZHAO J W, CHEN K X. Manning's formula and error analysis[J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(7): 313–314.】
- [17] 苏布达,施雅风,姜彤,等.长江荆江分蓄洪区历史演变、前景和风险管理[J].自然灾害学报, 2006, 15(5): 19–27.  
【SU B D, SHI Y F, JIANG T, et al. Historic development perspective and flood risk management of the Jingjiang Flood Diversion District in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(5): 19–27.】
- [18] 江志红,丁裕国,朱莲芳,等.利用广义帕累托分布拟合中国东部日极端降水的试验[J].高原气象, 2009, 28(3): 573–580.  
【JIANG Z H, DING Y G, ZHU L F, et al. Extreme precipitation experimentation over Eastern China based on generalized Pareto distribution[J]. Plateau Meteorology, 2009, 28(3): 573–580.】
- [19] 程炳岩,丁裕国,张金铃,等.广义帕累托分布在重庆暴雨强降水研究中的应用[J].高原气象, 2008, 27(5): 1004–1009.  
【CHENG B Y, DING Y G, ZHANG J L, et al. Application of generalized Pareto distribution to the research of extreme rainfall of Chongqing[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(5): 1004–1009.】
- [20] 石勇.基于情景模拟的上海中心城区道路的内涝危险性评价[J].世界地理研究, 2013, 22(4): 152–158, 175.  
【SHI Y. The hazard assessment of roads waterlogging disasters in Shanghai based on scenario simulation[J]. World Regional Studies, 2013, 22(4): 152–158, 175.】

## RISK REGIONALIZATION OF URBAN ROADS WATERLOGGING DISASTERS BASED ON GIS RAINSTORM FLOOD INUNDATION MODEL

YE Li-mei<sup>1</sup>, ZHOU Yue-hua<sup>1</sup>, XIANG Hua<sup>1</sup>, NIU Ben<sup>2,3</sup>, GAO Wei<sup>4</sup>, ZHOU Yu<sup>5</sup>

(1. Wuhan Regional Climate Centre, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074, China;

3. Xiantao Meteorological Office of Hubei Province, Xiantao 433000, China;

4. China University of Geosciences Faculty of information engineering, Wuhan 430074, China;

5. Xiangyang Meteorological Office of Hubei Province, Xiangyang 441021, China)

**Abstract:** Based on acquiring rainfall return period and pumping rainfall of Xiangyang center city, submerged depth and scope of disaster-causing areal rainfall in different return period were obtained by using GIS Rainstorm Flood Inundation Model. Waterlogging flood risk distribution of urban roads was made according to the actual impact of urban waterlogging on the roads. The results indicated that this method could directly show the waterlogging flood risk distribution of different threshold rainfall in different area, quantitatively assessed the submerged depth and scope of flood. Meantime, the method could provide waterlogging flood risk distribution of urban roads, combined with the urban roads information and positioning high-risk waterlogged street, and put forward scientific basis for government.

**Key words:** rainstorm flood inundation model; urban waterlogging disasters; risk regionalization