

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.11.019

排水模型和 GIS 模糊综合评价在内涝风险评估中的应用

蔡 甜¹, 王 佳²

(1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014; 2. 湖南大学设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410006)

摘 要: 考虑危险性、敏感性、脆弱性三大风险因素,选取 8 个代表性指标构建内涝风险模糊综合评价模型。以江西省宜丰县为例,通过 DigitalWater Simulation 排水模型设计 10、20、50、100 年一遇降雨边界条件,模拟城区的内涝情景。将 DigitalWater Simulation 模型输出的淹没数据与其他指标数据在 GIS 中完成数据处理与模糊综合评价过程,最终作出内涝风险分布图。研究表明,排水模型在内涝情景模拟方面具备一定的精度,研究区在超过 50 年一遇降雨时,积水范围基本不再扩大。在 50 年一遇降雨条件下,相对于单纯的危险性评估结果,经过模糊综合评价后,高风险等级面积占比下调了 32.44%,表明内涝风险是多指标共同作用的结果。

关键词: 模糊综合评价; GIS; 排水模型; 内涝模拟; 风险评估

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)11-0117-08

Application of Drainage Model and GIS Fuzzy Comprehensive Evaluation in Waterlogging Risk Assessment

CAI Tian¹, WANG Jia²

(1. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China; 2. Hunan University Design and Research Institute Co. Ltd., Changsha 410006, China)

Abstract: Considering three risk factors of hazard, sensitivity and vulnerability, a fuzzy comprehensive evaluation model of waterlogging risk was constructed by selecting eight representative indicators. Taking Yifeng County in Jiangxi Province as an example, the rainfall boundary conditions of 10-year, 20-year, 50-year and 100-year return periods were designed by the DigitalWater Simulation drainage model to simulate the waterlogging scenario. The data outputted from the DigitalWater Simulation model and other indicator data were inputted in GIS to complete the data processing and fuzzy comprehensive evaluation, and the waterlogging risk distribution map was eventually made. The results showed that the drainage model had certain precision in the simulation of waterlogging scenario. Under the condition of design rainfall with return period of more than 50 years in the study area, the waterlogging area was almost no longer expanded. Compared with the simple risk assessment results, the proportion of high-risk area was reduced by 32.44% after fuzzy comprehensive evaluation, indicating that the waterlogging risk was affected by many indicators.

Key words: fuzzy comprehensive evaluation; GIS; drainage model; waterlogging simulation; risk assessment

随着城市化进程的加快,进而出现“热岛”“雨岛”等连锁效应,导致极端暴雨频现^[1]。相关研究

表明,洪涝灾害是发生频次最高的自然灾害^[2]。中国由于人口、经济的发展相对集中,已然成为受灾最

严重的国家^[3]。因此,探寻及建立有效的内涝风险评估方法和内涝防治系统成为了当今的研究热点。

目前,历史灾情法^[4]、指标体系法^[5]、情景模拟法^[6]、GIS 和遥感法^[7]常被用来评估洪涝风险,其中,历史灾情法计算过程简单,指标体系法考虑因素全面,情景模拟法输出结果直观,GIS 及遥感法则具备数据处理和可视化表达的双重优势。从指标数据的通用性来看,各方法优势的可结合性仍有很大的研究空间。随着计算机技术的发展,SWMM、MIKE、InfoWorks 等排水模型逐渐普及并在内涝仿真模拟方面取得了一些成果^[8-10]。DigitalWater Simulation 模型(简称 DS 模型)是国内自主研发的一维-二维模型,近年来被应用在城市防洪模拟及规划方面^[11-12]。DS 模型基于 SWMM 模型开发,并与 GIS 平台无缝衔接,使得建模过程和模拟结果展示都得到了很大优化。20 世纪以来,国际上完成了 DRI、AP、Hospots 三大灾害风险指标计划,三大计划均将危险性、敏感性、脆弱性三大风险因素纳入指标体系,这为内涝灾害指标体系的构建提供了指导。模糊综合评价法是一种不确定性分析法,在评估分析洪水灾害风险方面具有较大优势^[13-15]。

笔者提出将指标体系法、排水模型法和 GIS 法联用,以宜丰县为例,通过 DS 模型获取其危险性数据,再导入 GIS 结合其他数据进行模糊综合评价,最终利用 GIS 的栅格叠加功能完成风险分布图绘制,旨在探索一种新的内涝风险评估思路,以达到风险预警和减灾的目的。

1 材料与方法

1.1 研究区域

选取江西省宜丰县城城区作为研究区域,其面积为 11.42 km²,人口约 6 万人,地势西北高、东南低,北风为主导风向。宜丰县气候温和,平均气温为 16.4~18.0℃,平均降雨量为 1 720.6 mm。耶溪河是县域内的主要河流,由西北经南绕城向东而去,同时也是雨水的受纳水体。本次案例的研究区分别位于耶溪河的北岸、南岸以及西岸。宜丰县城城区的排涝标准为 20 年一遇暴雨 1 d 排干。

1.2 研究方法

本研究先通过指标体系法构建内涝风险模糊综合评估模型,再利用 DS 模型和 GIS 作为数据准备和处理的工具,随后确定指标的隶属度函数和权重系数,按照最大隶属度原则完成内涝风险评估。

1.2.1 指标体系构建

按照系统性、代表性、可操作性、可量化性原则构建内涝风险评估指标体系,其中风险为目标层,危险性、敏感性、脆弱性三大风险因素为准则层,各风险因素又包含以下具体指标:

危险性因素包含积水深度、积水面积、积水时间 3 个指标。积水深度体现了地表产、汇流能力和排水管渠过流能力的差值,积水时间体现了暴雨灾害持久性和时效性,而积水面积则反映了暴雨灾害风险的时空分布和作用范围。

敏感性因素由地面高程、不渗透率、地形坡度 3 个指标组成。地面高程确定了水流的势能,不渗透率体现了下垫面的透水能力,地形坡度决定了洪水的流向和流速。

脆弱性因素包含建筑密度和兴趣点密度两个指标。本研究采用建筑密度侧面体现人口密度。笔者将城市的工、商、学、医等单位定义为兴趣点(Points of Interest, POI),兴趣点密度则为单位面积上的兴趣点个数。兴趣点密度体现了区域的经济繁荣程度和减灾能力,如果学校、医院、厂区等区域受淹,城市的社会经济和居民的人身安全将难以保障。

1.2.2 内涝风险模糊综合评估模型

内涝风险模糊综合评估模型的框架结构如图 1 所示,主要由两个部分组成,上半部分为评估模型的指标体系,下半部分为模型的求解过程,包含权重矩阵的分解和权重系数的确定以及数据图层的叠加过程均在 GIS 中完成。

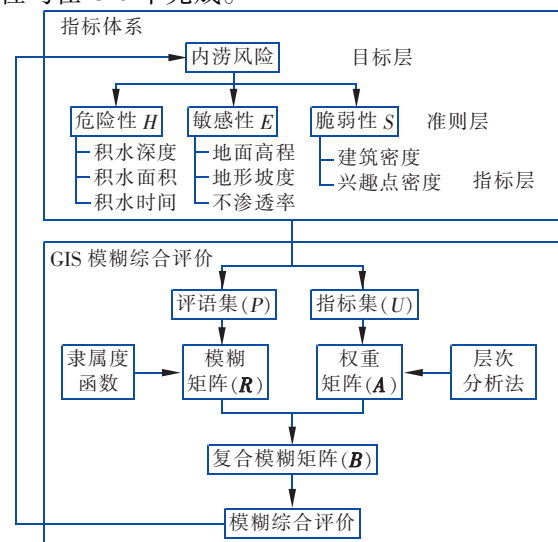


图 1 评估模型框架

Fig. 1 Framework of assessment model

2 基于排水模型的内涝情景模拟

2.1 模型构建

2.1.1 管网导入

用于建模的原始管网数据 AutoCAD 格式的物探图,利用 Arcmap 的 ArcToolbox 工具箱的提取分析功能,在筛选窗口下利用简单的 SQL 表达式对管网按图层分类提取并存至个人地理信息数据库。然后在 DS 模型中导入管网,并在模型中对管网进行拓扑检查及数据校验,即完成管网的导入及概化过程。最终的人孔节点总计 291 个,排放口节点 13 个,管段/管渠总计 291 条,管道管径、长度均自动导入,粗糙系数设为 0.013。

2.1.2 汇水区划分

汇水区划分前,先将当地测绘局提供的北京 1954 坐标系的高程点转换成 DEM。对于较大的研究区,推荐的做法是先将 DEM 通过水文分析工具得到流域分区,再进行泰森多边形划分^[16]。本研究首先将研究区划分为 9 个流域,然后以流域边界、河流边界、人孔作为泰森多边形的参考图层,最终将研究区划分为 274 个集水区。本次 DS 模型设定不透水区、透水区的粗糙系数分别为 0.013、0.24;采用 Horton 入渗模型,起始入渗率和最终入渗率分别为 75.4、3.08 mm/h;不透水区和透水区的洼地蓄水量分别设定为 1.505、4.66 mm。

2.1.3 一维-二维模型耦合

DS 模型拥有独立的网格划分引擎,在进行一维管网模型和二维地表耦合时,模型会根据模拟的精度将二维地表概化为 n 个大小与模拟精度一致的网状明渠,并在网格间自动均匀地生成二维检查井。一维检查井发生洪流时,模型自动搜索最近的二维检查井,并建立连接渠道,使一维管网的水流进入二维地表明渠。通过这样的处理,明渠的坡度即为地形坡度,明渠中的水流深度即为积水深度。本次模拟中,将 DEM 中道路和建筑的高程依次下降 0.18 m 和抬高 30 m。

2.2 模型验证

选用 2018 年 3 月 16 日和 4 月 13 日的场次降雨对 DS 模型进行验证,二者的累计降雨量分别为 12.50、380.07 mm。将研究区划分为上、中、下 3 个监测区域,并在区域边界的道路进行雨水径流量监测,监测及模拟结果见图 2。二维地表淹没模型采用 2018 年 4 月 13 日场次降雨的积水深度进行验

证,结果表明,山峰垌路、新昌西大道、迎宾大道、渊明南大道、外环东路、物华路的实测积水深度分别为 0.48、1.18、0.82、0.40、0.11、0.23 m,模拟积水深度分别为 0.46、1.24、0.76、0.37、0.12、0.25 m,相对误差分别为 -4.17%、5.08%、-7.32%、-7.50%、9.09%、8.70%,相对误差均控制在 $\pm 10\%$ 以内,说明模型的验证结果良好。另外,模型的准确度常用相对误差和纳什系数 N_s 来评价^[10]。经分析,本次模型在 2018 年 3 月 16 日和 4 月 13 日场次降雨下的 N_s 分别为 0.83、0.86,相对误差分别为 -2.30% 和 6.08%,模拟的准确度较高,可用于研究区洪水灾害情景模拟。

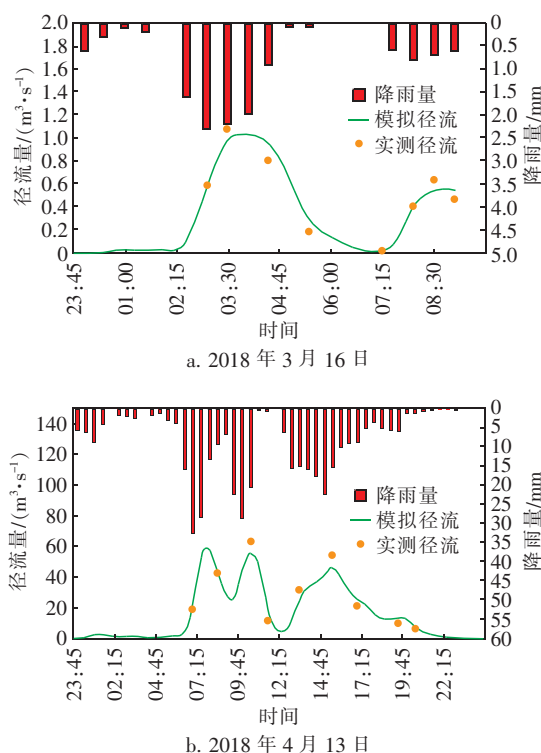


图2 场次降雨径流量监测与模拟结果

Fig. 2 Runoff monitoring and simulation results of two rainfall events

2.3 模型边界条件

芝加哥雨型对中国的降雨有着很强的适应性^[17],故采用芝加哥雨型合成的降雨时间序列作为 DS 模型的设计降雨。宜丰县暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{2198 \times (1 + 0.72 \lg P)}{(t + 8)^{0.75}} \quad (1)$$

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

通过芝加哥雨型生成 10、20、50、100 年一遇的

高重现期降雨作为边界条件,模拟研究区在暴雨环境中的洪水淹没情况,取雨峰系数为0.35,生成历时为120 min的短历时降雨时间序列。

2.4 情景模拟结果

将模型的模拟时长设定为24 h,模拟步长设为30 s,模拟精度设置为55 m×55 m。借助DS模型的积水分析结果统计功能,4种重现期下研究区模型输出的最大积水深度和积水时间分别如图3和图4所示。

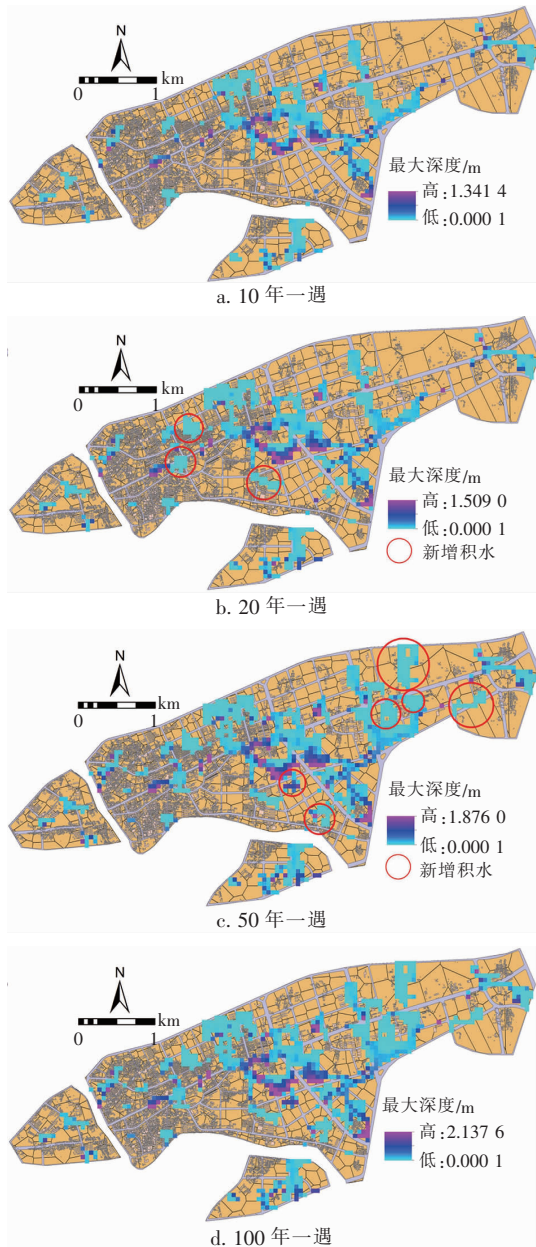


图3 不同重现期下研究区的最大积水深度

Fig. 3 Maximum ponding depth under different return periods

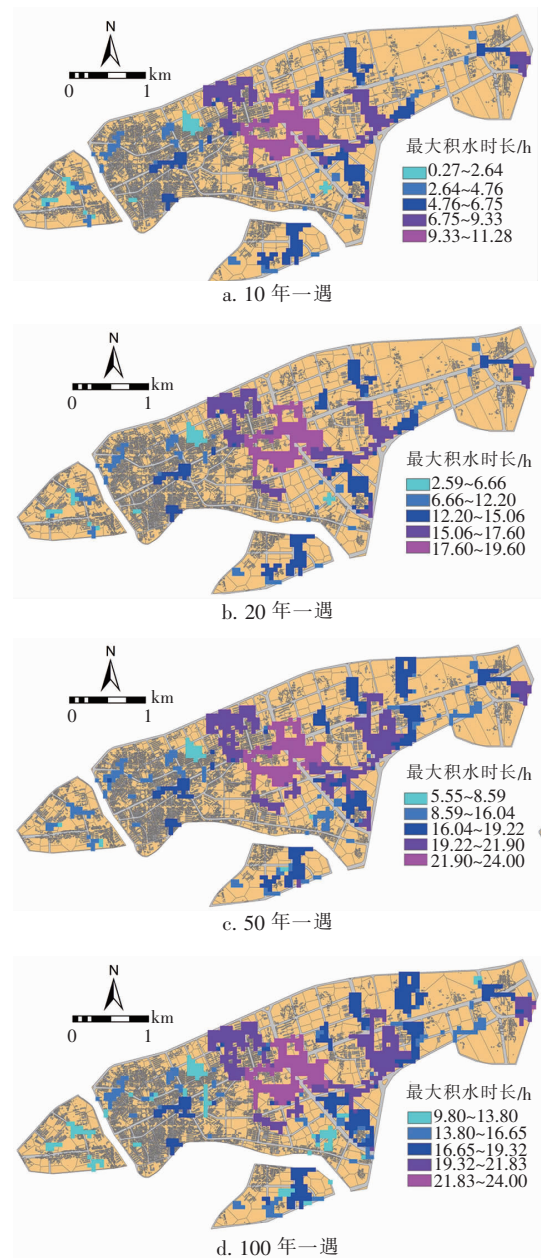


图4 不同重现期下研究区的最大积水时间

Fig. 4 Maximum ponding duration under different return periods

由图3可知,研究区在10年一遇降雨条件下内涝情况并不严重。随着降雨重现期的增大,研究区在20、30年一遇降雨条件下分别新增3处、6处积水,且超过50年一遇降雨时,研究区的积水范围已基本不再扩散。由图4可以看出,降雨重现期从10年一遇提高到100年一遇时,研究区的最短积水时间从0.27 h升高到了9.80 h。当降雨重现期增大到50年一遇时,研究区在24 h内并未排干积水,这说明50年一遇降雨已经超出了研究区的排涝能力。

3 基于GIS模糊综合评价的内涝风险评估

3.1 隶属度与间断点

3.1.1 隶属度函数

由于洪水灾害风险与八大指标呈线性关系,本研究采用较为常用的升、降半梯形和三角形分段隶属度函数^[18]来进行因素集 U 中各指标 u_i 对于评语集 P 的隶属度($u_i p_i$)计算,其分段隶属度函数如下:

$$u_i p_1 = \begin{cases} 1 & 0 < x \leq C_{i1} \\ \frac{C_{i2} - x}{C_{i2} - C_{i1}} & C_{i1} < x < C_{i2} \\ 0 & x \geq C_{i2} \end{cases} \quad (2)$$

$$u_i p_j = \begin{cases} 0 & x \leq C_{ij-1} \text{ 或 } x \geq C_{ij+1} \\ \frac{x - C_{ij-1}}{C_{ij} - C_{ij-1}} & C_{ij-1} < x \leq C_{ij} \\ \frac{C_{ij+1} - x}{C_{ij+1} - C_{ij}} & C_{ij} < x < C_{ij+1} \end{cases} \quad (3)$$

$$u_i p_m = \begin{cases} 0 & x \leq C_{im-1} \\ \frac{x - C_{im-1}}{C_{im} - C_{im-1}} & C_{im-1} < x < C_{im} \\ 1 & x \geq C_{im} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i=1,2,3,\dots,n; j=1,2,3,\dots,m-1; m$ 为分级数; C 为间断点。

以上公式表明:指标 u_i 在同一横坐标处可能有两个隶属度值,按照最大隶属度原则,指标 u_i 更倾向于隶属度值接近1的风险等级。

3.1.2 间断点

各指标的间断点取值见表1。

表1 评价指标的间断点设置

Tab.1 Discontinuity point setting of evaluation indexes

评价指标 U	Δ	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
u_1 积水深度/m	0.20	0.01	0.21	0.41	0.61	0.81
u_2 积水时间/h	3.61	5.55	9.16	12.77	16.38	19.99
u_3 积水面积/ hm ²	37.48	0.30	37.78	75.26	112.74	150.22
u_4 地面高程/m	8.64	97.85	89.21	80.57	71.93	63.29
u_5 地形坡度/%	1.99	0.94	2.93	4.92	6.91	8.90
u_6 不透透率/%	16.55	0.62	17.17	33.72	50.27	66.82
u_7 建筑密度/%	0.09	0.09	0.18	0.27	0.36	0.45
u_8 兴趣点密度/ (个·hm ⁻²)	2.17	0.20	2.37	4.54	6.71	8.88

间断点的设置就是对数据进行去量纲化处理,先确定评估模型的评语集 $P=(p_1, p_2, \dots, p_5)$,依次对应低风险(p_1)、较低风险(p_2)、中度风险(p_3)、较高风险(p_4)、高风险(p_5)5个风险等级。然后,对每

一指标的数据集划分间断点 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 ,依次作为 $p_1 \sim p_5$ 的评价界定点。根据统计学的方法,采用格栅数据集的平均值与标准差的较小者作为等距间隔值。

3.2 指标权重系数与模糊矩阵

3.2.1 权重系数

按照内涝风险模糊综合评估模型确定的指标体系为各层次的指标、因素赋予权重,结合相关文献^[19],根据专家打分,本研究确定的权重如表2所示。可以看出,指标层中积水深度的权重最大,地形坡度的权重最小;准则层中危险性因素最大,敏感性因素最小。以上权重均在 $CR \leq 0.1$ 的情况下求得,说明其判断矩阵通过了一致性校验,权重的计算结果合理。

表2 权重的设置

Tab.2 Setting of the weights

目标层	准则层	指标层	指标权重	准则权重
内涝风险	危险性	积水深度	0.243 4	0.493 4
		积水时间	0.153 4	
		积水面积	0.096 6	
	敏感性	地面高程	0.120 3	0.195 8
		地形坡度	0.023 0	
		不透透率	0.052 5	
	脆弱性	建筑密度	0.207 2	0.310 8
		兴趣点密度	0.103 6	

3.2.2 复合模糊矩阵

将表1中的各指标 $u_1 \sim u_8$ 改写为权重矩阵与模糊矩阵的乘积形式,即得到复合模糊矩阵 B (也可称为结果矩阵):

$$B = A \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \cdot \begin{bmatrix} u_4 p_1 & u_4 p_2 & u_4 p_3 & u_4 p_4 & u_4 p_5 \\ u_5 p_1 & u_5 p_2 & u_5 p_3 & u_5 p_4 & u_5 p_5 \\ u_6 p_1 & u_6 p_2 & u_6 p_3 & u_6 p_4 & u_6 p_5 \end{bmatrix} \\ A_2 \cdot \begin{bmatrix} u_4 p_1 & u_4 p_2 & u_4 p_3 & u_4 p_4 & u_4 p_5 \\ u_5 p_1 & u_5 p_2 & u_5 p_3 & u_5 p_4 & u_5 p_5 \\ u_6 p_1 & u_6 p_2 & u_6 p_3 & u_6 p_4 & u_6 p_5 \end{bmatrix} \\ A_3 \cdot \begin{bmatrix} u_7 p_1 & u_7 p_2 & u_7 p_3 & u_7 p_4 & u_7 p_5 \\ u_8 p_1 & u_8 p_2 & u_8 p_3 & u_8 p_4 & u_8 p_5 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: B 为结果矩阵, A_1, A_2, A_3 分别为危险性、

敏感性、脆弱性的权重矩阵, $u_i p_i$ 为隶属度。

复合模糊矩阵需在 GIS 中分解计算, 并利用 Max 函数按照最大隶属度原则进行风险分级。

3.3 数据准备与处理

数据准备与处理就是数据转为栅格化图层的过程, 只有所有数据都是栅格数据, 才能在 GIS 中完成模糊矩阵分解与权重叠加。其中 DS 模型的输出结果(危险性因素)可导出为栅格数据, 因此危险性因素的数据可通过 DS 模型获得。敏感性因素的地形高程和地形坡度则可以利用 GIS 的 Spatial Analyst 工具和分区统计工具获得, 地表不渗透率则根据遥感解析工具计算其平均值。脆弱性因素中的建筑密度由 CAD 的建筑地图导入 GIS 获得。相对而言, 兴趣点密度的获取难度较大, 本研究中兴趣点分为餐饮、住宿、购物、工商、教育、医疗 6 类, 通过 Python 代码获取了百度地图上截至 2018 年 8 月的宜丰县 1 830 个兴趣点[见图 5(a)], 转换坐标并导入 GIS, 同样以分区统计工具得到兴趣点密度[如图 5(b)所示]。

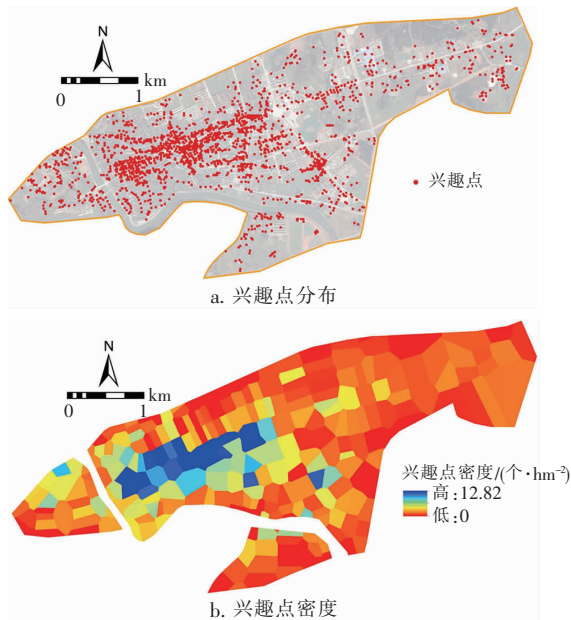


图 5 研究区兴趣点密度

Fig. 5 POI density of the study area

3.4 内涝风险评估结果与分析

通过前文的模拟结果可知, 研究区在 50 年一遇降雨情景下的灾害分布已基本稳定, 所以本研究在 50 年一遇降雨条件下作出内涝风险分布图。图 6(a)、(b) 分别是研究区内涝风险的敏感性和脆弱性评估结果。

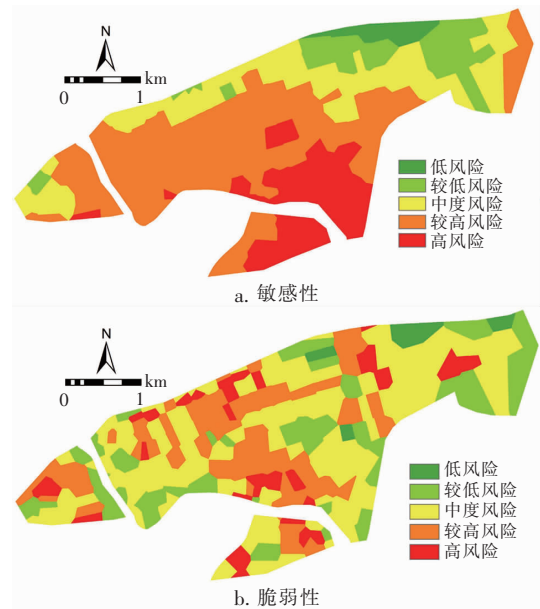


图 6 敏感性和脆弱性评估结果

Fig. 6 Sensitivity and vulnerability assessment results

纵观图 6(a) 中研究区的敏感性风险评估结果, 发现研究区中部区域由南至北风险等级依次升高; 高风险区域大部分位于研究区东南区域的河流两侧, 这可能是由于虽然沿河区域不渗透率低, 但其地面高程低且地形坡度陡, 因此, 该区域的评估结果为高风险。图 6(b) 显示, 在脆弱性评估之后, 研究区域的风险等级按面积比率排列为: 中度风险 > 较高风险 > 较低风险 > 高风险 > 低风险; 另外, 各风险等级的分布没有像敏感性评估结果那样连续、规整, 这是由于建筑和兴趣点可能存在空间分布的差异, 即建筑密度大的地方不一定兴趣点密度大。

为比较下垫面属性和社会、经济条件对评估结果的影响, 将危险性评估结果(只考虑积水情况)和模糊综合评价结果列在一起, 如图 7 所示。从危险性评估结果来看, 研究区的高风险等级占绝对优势, 说明研究区的积水情况不容乐观, 有较多大片、长历时、高深度的积水区域。经分析, 风险等级被削弱的原因主要如下: 一方面, 危险性评价中的部分高风险区域的下垫面具有地形坡度、不渗透率较小或者地面高程较高等特性, 削弱了风险等级; 另一方面, 部分高风险区域位于建筑密度和兴趣点密度都较小的区域, 因居住人口较少且工、商、学、医的兴趣点又不多, 故而发生积水时人们对生命财产影响不大。为进一步统计两个评估结果的风险等级变化情况, 列出了研究区在危险性评价和模糊综合评价后的风

险面积对比,如表 3 所示。

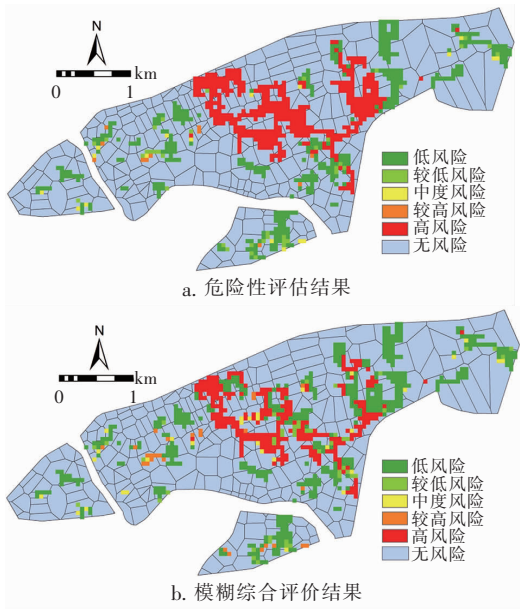


图 7 危险性评估结果和模糊综合评价结果对比
Fig. 7 Comparison of hazard factor assessment and fuzzy comprehensive evaluation

表 3 研究区风险等级面积对比

Tab. 3 Area comparison of risk level

项 目	面积 1/km ²	面积 2/km ²	面积变化率/%
低风险	1.15	1.44	25.22
较低风险	0.12	0.14	17.95
中度风险	0.05	0.09	72.22
较高风险	0.03	0.08	145.45
高风险	1.24	0.84	-32.44

注：面积 1 和面积 2 分别表示图 7(a) 和 (b) 中各风险等级的面积。

从表 3 可以看出,低风险、较低风险、中度风险、较高风险、高风险的面积变化率依次为 25.22%、17.95%、72.22%、145.45%、-32.44%,其中只有高风险的面积变化率为负值,表明经模糊综合评价后,只有高风险等级被削弱,其余风险等级均有增强的效果。表 3 中面积变化率较大的是较高风险和 中度风险等级,说明面积 1 中大部分高风险等级区域转为了面积 2 中的较高风险和 中度风险等级,其余风险等级略有增长。

4 结论

采用指标体系法、排水模型法和 GIS 法联用的方法来评估内涝风险,提出一种内涝风险模糊综合评价模型,并采用 DS 模型和 GIS 作为数据准备和处理的工具,得出以下结论:

① 排水模型如果具备将结果导出为栅格数据

的功能,可与 GIS 结合起来发挥情景模拟和数据叠加并可视化展示的优势。

② 兴趣点包含了重要区域的位置,当经济损失难以估计时,也可将兴趣点密度作为经济类指标。

③ 内涝风险是一个多指标共同作用的结果,下垫面及社会、经济属性均会增强或降低积水区域的风险等级。

参考文献:

[1] 孙激. 北京地区暴雨气候特征及其变化分析[J]. 气候与环境研究,2010,15(5):672-676.
SUN Wei. Analysis of the climatic characteristics and the variations of the rainstorm in Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15 (5) : 672 - 676 (in Chinese).

[2] LIAN J, XU H, XU K, et al. Optimal management of the flooding risk caused by the joint occurrence of extreme rainfall and high tide level in a coastal city [J]. Natural Hazards, 2017, 89 : 183 - 200.

[3] CHOU J, XIAN T, DONG W, et al. Regional temporal and spatial trends in drought and flood disasters in China and assessment of economic losses in recent years [J]. Sustainability, 2019, 11 (1) : 55.

[4] ADIKARI Y, OSTI R, NORO T. Flood-related disaster vulnerability: an impending crisis of megacities in Asia [J]. Journal of Flood Risk Management, 2010, 3 (3) : 185 - 191.

[5] GUO E, ZHANG J, REN X, et al. Integrated risk assessment of flood disaster based on improved set pair analysis and the variable fuzzy set theory in central Liaoning Province, China [J]. Natural Hazards, 2014, 74:947-965.

[6] WILLEMS P. Revision of urban drainage design rules after assessment of climate change impacts on precipitation extremes at Uccle, Belgium [J]. Journal of Hydrology, 2013, 496:166-177.

[7] 李栋, 吴博, 郑秀清, 等. 基于 AHP 和 GIS 的吕梁地区小流域山洪灾害风险区划 [J]. 水电能源科学, 2017, 35 (7) : 85 - 88, 96.
LI Dong, WU Bo, ZHENG Xiuqing, et al. Risk regionalization of mountain torrent disaster in small watershed of Lvliang area based on AHP and GIS [J]. Water Resources and Power, 2017, 35 (7) : 85 - 88, 96 (in Chinese).

[8] ROSA D J, CLAUSEN J C, DIETZ M E. Calibration and

- verification of SWMM for low impact development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2015, 51(3): 746 – 757.
- [9] PAPAIOANNOU G, LOUKAS A, VASILIADES L, *et al.* Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach [J]. Natural Hazards, 2016, 83: 117 – 132.
- [10] 黄国如, 罗海婉, 陈文杰, 等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 643 – 652.
- HUANG Guoru, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, *et al.* Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong Basin, Guangzhou [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 643 – 652 (in Chinese).
- [11] 陈小龙, 赵冬泉, 盛政, 等. DigitalWater 在城市排水防涝规划中的应用[J]. 中国给水排水, 2015, 31(21): 105 – 108.
- CHEN Xiaolong, ZHAO Dongquan, SHENG Zheng, *et al.* Application of DigitalWater simulation system in urban flood control planning [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(21): 105 – 108 (in Chinese).
- [12] 赵冬泉, 邢薇, 佟庆远, 等. 基于数字排水技术的城市雨洪控制方案设计与评估[J]. 中国给水排水, 2010, 26(16): 74 – 77.
- ZHAO Dongquan, XING Wei, TONG Qingyuan, *et al.* Design and evaluation of urban stormwater management projects based on DigitalWater drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(16): 74 – 77 (in Chinese).
- [13] ZHAO H, YAO L, MEI G, *et al.* A fuzzy comprehensive evaluation method based on AHP and entropy for a landslide susceptibility map[J]. Entropy, 2017, 19(8): 396.
- [14] GIGOVIC L, PAMUCAR D, BAJIC Z, *et al.* Application of GIS-interval rough AHP methodology for flood hazard mapping in urban areas[J]. Water, 2017, 9(6): 360.
- [15] LAI C, CHEN X, CHEN X, *et al.* A fuzzy comprehensive evaluation model for flood risk based on the combination weight of game theory [J]. Natural Hazards, 2015, 77: 1243 – 1259.
- [16] 罗海婉, 陈文杰, 李志威, 等. 基于耦合水动力模型的广州市东濠涌流域洪涝模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 46 – 52, 65.
- LUO Haiwan, CHEN Wenjie, LI Zhiwei, *et al.* Flood simulation of Donghaochong Basin in Guangzhou City based on coupled hydrodynamic model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(3): 46 – 52, 65 (in Chinese).
- [17] 侯精明, 郭凯华, 王志力, 等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 820 – 828.
- HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, *et al.* Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6): 820 – 828 (in Chinese).
- [18] YANG W, XU K, LIAN J, *et al.* Multiple flood vulnerability assessment approach based on fuzzy comprehensive evaluation method and coordinated development degree model [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 213: 440 – 450.
- [19] LYU H M, SUN W J, SHEN S L, *et al.* Flood risk assessment in metro systems of mega-cities using a GIS-based modeling approach [J]. Science of the Total Environment, 2018, 626: 1012 – 1025.

作者简介: 蔡甜(1995 –), 男, 重庆合川人, 硕士, 工程师, 研究方向为城市给水排水工程。

E-mail: caitian98@163.com

收稿日期: 2020 – 02 – 01

修回日期: 2020 – 04 – 29

(编辑: 刘贵春)