

# 基于 GIS 空间分析建模技术的内涝风险评估

王林森, 熊小兰, 柯庆, 陶涛  
(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 以 ArcGIS 地理处理中的空间分析模块为主, 利用“Model builder”及空间建模技术创建了城市暴雨内涝灾害风险指标评估模型。在风险综合评估与区划的研究中, 用层次分析法确定了每个风险指标的评价权重, 并将模糊评价应用于 GIS 风险指标栅格数据, 从而实现了有关风险指标的数据管理、空间分析模型和空间制图表达技术的结合。模型建成后可以高效完成各指标的计算、中间文件的管理、数据的更新和评估结果的空间制图表达, 实现城市暴雨风险指标评估过程的流程化操作。将 GIS 空间分析建模技术应用于工程实例中, 得到了风险评估分级与区划成果, 可为城市内涝这种突发性自然灾害的救灾、减灾等提供信息保障和决策支持。

**关键词:** 暴雨; 城市内涝; 风险; 评估模型; 地理信息系统

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)03-0115-04

## GIS-based Spatial Analysis Modeling Techniques for Urban Flooding Risk Assessment

WANG Lin-sen, XIONG Xiao-lan, KE Qing, TAO Tao

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Urban flooding risk assessment models mainly based on spatial analysis module were constructed by Model builder in ArcGIS. During the process of risk assessment and zoning, weight of each indicator was determined by AHP, and fuzzy evaluation method was applied to raster data of each indicator in GIS so as to realize the combination of data management, spatial analysis model and spatial mapping technology. The completed model could efficiently finish the calculation of each index, the management of intermediate documents, data update and spatial mapping expression of the evaluation results. It could also realize the processing operation of urban flooding risk assessment. GIS-based spatial analysis modeling techniques were applied to a practical engineering case. Classification of risk assessment and risk zoning map were obtained, and these results can provide information and decision supports for the response and reduction of sudden natural disasters like urban flooding.

**Key words:** rainstorm; urban flooding; risk; assessment model; GIS

城市暴雨内涝是一种严重的自然灾害, 由于暴雨内涝灾害具有短时性和突发性特征, 如果缺乏对内涝灾害风险的预警系统和应急准备机制, 极有可能导致灾害加重。因此研究城市暴雨内涝灾害风险

孕育机制、评价方法与技术体系, 实现对灾害风险程度的评估, 因地制宜地采取风险管理对策, 提高区域防涝减灾能力已成为一项十分紧迫的任务。

近年来, 随着地理信息系统技术(GIS)的快速

发展,基于 GIS 的模糊综合评判方法受到越来越多学者的青睐。空间分析技术是 GIS 的核心,在地理数据的应用中具有举足轻重的作用。GIS 集成了多个学科的最新技术,如数据库管理、区划、插值算法以及网络分析等,形成了空间分析强大的工具,可以将比较复杂、困难的空间分析任务变得简单易行。此外,GIS 平台具有强大的制图功能,能清晰、直观地将风险评估的结果展现出来。将模糊综合评判方法与 GIS 技术相结合能有效提高工作效率以及评判结果的科学性<sup>[1,2]</sup>。基于此,笔者在 ArcGIS 平台中运用模糊综合评判方法,建立了城市暴雨内涝风险评估模型,并将该模型应用于实际工程案例中。

### 1 GIS 栅格数据的空间模糊综合评判方法

基于 GIS 的空间模糊综合评判方法是针对 GIS 管理的空间栅格数据提出的,其基本思想是以 GIS 栅格数据中的单个栅格为基本研究单元,确定空间中各点单因素评价指标的隶属度函数,进而将隶属度函数概念扩展到二维平面上,逐点进行多层次模糊综合评价,从微观的角度对宏观的风险状况进行衡量,最终获得整个研究空间上的模糊评价结果<sup>[3]</sup>。空间模糊综合评判的关键问题是隶属层的形成。本研究中的模糊评价流程如图 1 所示。

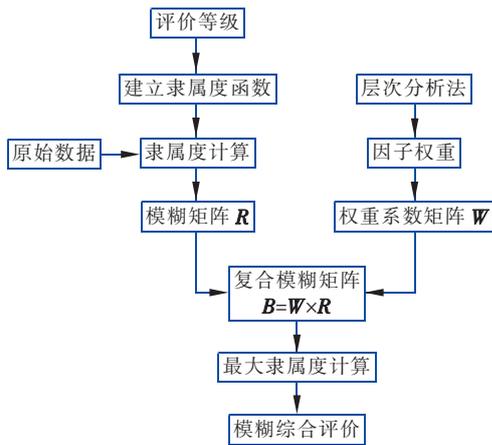


图 1 模糊评价流程

Fig. 1 Flow chart of fuzzy comprehensive evaluation method

## 2 城市暴雨内涝综合风险评估模型

### 2.1 城市暴雨内涝灾害分析

城市内涝是城市水循环极端现象的表现,是自然因素和社会因素共同作用的结果,因此城市内涝的孕灾环境具有“自然 - 社会”双重属性<sup>[4]</sup>。在当前的自然灾害研究中,风险三角形概念被提出并得

到普及,逐渐形成了国际上较为公认的危害风险机制。城市内涝灾害是城市暴雨作用于城市系统并在一定的孕灾情形下形成的灾害,根据风险三角形的定义,致灾因子的危险性、承灾体的暴露性和承灾体的脆弱性三个方面决定了城市暴雨内涝灾害的风险大小。依据该理论,灾害风险分析主要包括致灾因子分析、承灾体暴露性和脆弱性分析三个方面。在运用 InfoWorks ICM 模拟 50 年一遇暴雨条件下研究区域积水情况的基础上,结合已有的关于承灾体灾损曲线的研究成果,实现对城市暴雨内涝风险综合评估。模拟得到的研究区域积水分布图能直观地表达研究区域的受淹范围和程度,即反映了致灾因子的危险性和承灾体的暴露性;承灾体灾损曲线反映了积水深度与评价指标之间的定量关系,用于量化承灾体的脆弱性。

### 2.2 城市内涝风险评估指标

城市暴雨内涝综合评价的指标评价体系可分为总目标层、中间指标层以及承灾体详细指标层,如图 2 所示。中间指标层包含有形灾害损失和无形灾害损失,形成了包含道路交通、建筑体结构、室内财产、人口伤亡、公众心理焦虑和生产效率影响等 6 个因素的集合  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}$ ,将每个风险损害指标分为三级  $V = \{v_1, v_2, v_3\}$ ,分别对应低、中、高三个风险等级。本评估模型中每个风险指标会形成相对于评判等级的 3 个隶属层,6 个指标共形成 18 个隶属层。

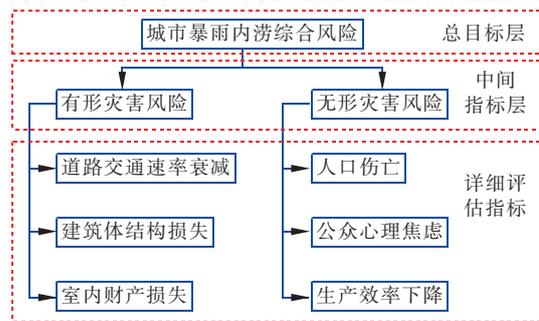


图 2 风险指标体系

Fig. 2 Risk assessment indicator system

依据图 1 所示的模糊综合评价流程,需要确定各个风险指标的权重。本研究采用层次分析法确定各指标的权重,并构成权重系数矩阵  $W$ 。

$$W = (W_1 \ W_2 \ W_3 \ W_4 \ W_5 \ W_6) = (0.36 \ 0.15 \ 0.27 \ 0.10 \ 0.06 \ 0.06) \quad (1)$$

### 2.3 隶属度函数的确定

隶属度函数有多种确定方法,由于各单项指标风险值空间连续分布,因此可采用折线型隶属度函数来确定各单因素指标对不同等级模糊子集的隶属度。折线型隶属度函数的构造关键是确定各等级分类的折点。ArcGIS 中包含多种标准分类方法,采用几何间隔法确定各评估指标的等级分类折点。几何间隔法通过将每类的元素平方和进行最小化来创建几何间隔。此选项尝试在突出显示中间值变化和极值变化之间寻求一种平衡,专门用于处理连续数据。使用该方法生成的结果外形美观、地图内容详尽,适用于风险指标数据集的分类。表 1 为通过 ArcGIS 几何间隔法确定的各等级分类的折点。

表 1 各评估指标的等级分类折点

Tab.1 Break point of risk assessment indicator classification

风险评估指标	$P_{i1}$	$P_{i2}$	$P_{i3}$
交通速度衰减	0.325	0.702	0.999
建筑体结构损伤	0.048 8	0.068 1	0.146
室内财产损失	0.010 1	0.028 8	0.105
人口伤亡	0.000 232	0.000 541	0.001 64
公众心理焦虑	1.055	2.995	11.692
生产效率影响	1.114	3.398	12.857

### 2.4 ArcGIS 空间建模

空间建模是在地理处理框架的基础上,通过“Model builder”将地理处理语言中的各个要素(即空间分析工具)按顺序连接在一起,建立合适的空间分析模型,从而快捷地将地理处理模型转变成软件。

#### ① 地理处理工具集的构建

地理处理工具集的目的在于利用软件模拟所得出的积水数据,根据各承灾体灾损曲线得到相应的损失数据。该工具集共包括 6 个模型,分别对应一个风险指标。在 ArcCatalog 目录树下“我的工具箱”中新建名为“城市暴雨内涝灾害风险评估工具集”,右键单击工具箱,在“New”中选择“Model”,依次生成 6 个空间分析模型。右键某个单击模型,选择“Edit”即可编辑模型,依据需要建立的模型添加相应的地理处理工具并设置好参数,最后检查并调试模型。

#### ② 单一指标隶属度计算模型的构建

单一指标模糊隶属度计算模型可用于计算每一个指标对应于每一个风险等级的隶属度。在图 3 所示的栅格计算器 1、2、3 中分别输入各级隶属度函

数,得到研究区域每个栅格对 3 个风险等级的隶属度值  $T_L$ 、 $T_M$  和  $T_H$ ,根据 2.2 节所确定的指标权重,在栅格计算器 4、5、6 中输入相应计算函数得到单一指标的  $(W_i \cdot R_{ij})$  值。对其余 5 个风险指标采用相同方法确定  $(W_i \cdot R_{ij})$  值,加和后可得到每个栅格对应于每一个风险等级的综合风险隶属度。

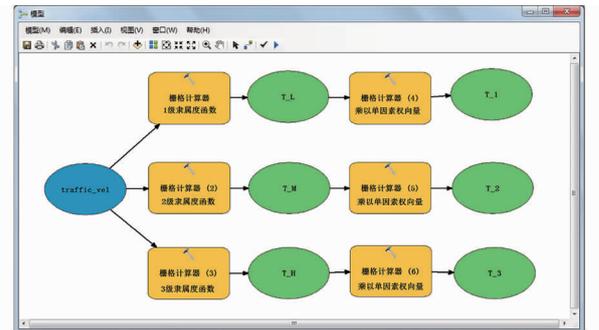


图 3 单一指标隶属度计算模型

Fig.3 Membership degree calculation model of single indicator

#### ③ 模糊综合评价模型的构建

模糊综合评价模型可以将单一指标隶属度计算模型得到的  $(W_i \cdot R_{ij})$  值进行加和,即为对应于某一风险等级的综合隶属度。该模型的另一主要处理工具为模糊叠加工具,可以对多准则叠加分析过程中某个现象属于多个集合的可能性进行分析。模糊叠加不仅可以确定某个现象可能属于哪个集合,还可以分析多个集合的成员之间的关系。ArcGIS 可以直接支持多种根据集合理论分析来合并数据的叠加方法。每种方法都可以对属于各种输入准则的每个单元的成员进行探究。在进行模糊综合评价过程中采用最大值叠加(即最大隶属度原则)确定综合风险指数是一种合理的方法。

### 3 工程实例

#### 3.1 研究区域概况

本研究选取上海的 BLJ 排水片区作为研究对象。BLJ 排水区域的服务面积为 1 682  $hm^2$ ,含 TQ、LLQ、YL、BLJ、YH 五座雨水泵站,其中 TQ 与 LLQ 雨水管网之间、BLJ 与 YH 雨水管网之间存在连通性。直径为 400 mm 的雨水管网的总长度约为 63 km。LLQ、BLJ、YL 泵站雨水排出口在白莲泾;TQ、YH 泵站雨水排出口在黄浦江。

#### 3.2 城市暴雨内涝综合风险评估结果

根据权重系数矩阵  $W$  和各指标的模糊矩阵  $R$ ,得出复合模糊矩阵,并最终根据最大隶属度原则得出模糊综合评判结果。在 ArcGIS 中可通过运用多

指标模糊综合叠加工具实现这一过程。图4为最终的城市暴雨内涝综合风险评估结果。

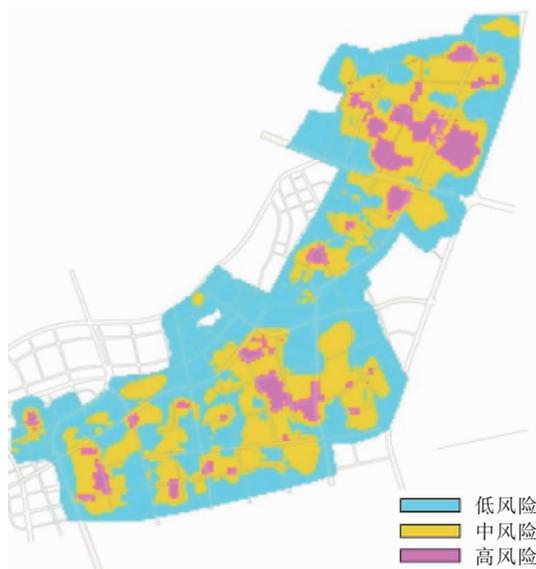


图4 暴雨内涝综合风险评估结果

Fig.4 Result of urban flooding risk assessment

采用GIS工具集中的重分类工具可以对栅格数据进行分类,并进而构建栅格统计数据,根据栅格重分类的统计数据,可以得到各风险等级的面积,见表2。

表2 各风险等级区域统计

Tab.2 Regional statistics of risk level

风险等级	栅格重分类值	栅格数目	栅格单元尺寸/m	分区面积/hm <sup>2</sup>	面积比例/%
低风险	1	10 448	25 × 25	653	53.5
中风险	2	7 384	25 × 25	461.5	37.8
高风险	3	1 694	25 × 25	105.8	8.7
总计	—	—	—	1 220.3	100

#### 4 结论

本研究基于城市暴雨内涝模型的高精度灾害情景模拟成果,利用GIS地理处理工具和空间建模技术,并结合模糊综合评判方法开发了城市暴雨内涝灾害风险评估模型,可以实现数据管理、空间分析模

型和空间制图表达技术的结合,完成了多风险指标的综合评估。模型建成后可以高效完成各指标的计算、评估结果空间制图表达、中间文件的管理以及自动的数据更新功能,实现了单一风险指标评估过程的流程化管理。通过GIS平台得到的风险评估图能清晰和直观地展现研究区域不同等级风险的分布情况,从而为城市管理者应对城市内涝风险提供决策依据。

#### 参考文献:

- [1] 蒋卫国,李京,李忠武,等. 洪水灾害人口风险模糊评价[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2008,35(9):84-87.
- [2] 唐川,朱静. 基于GIS的山洪灾害风险区划[J]. 地理学报,2005,60(1):87-94.
- [3] 王英刚,冯治宇,程武良. 城市环境质量多层次模糊综合评价法[J]. 环境保护科学,2000,(增刊):85-87.
- [4] 陆亚龙,肖功建. 气象灾害及其防御[M]. 北京:气象出版社,2001.



作者简介:王林森(1993-),男,安徽六安人,硕士研究生,研究方向为给排水管网设计与运行优化。

E-mail:2014wls@tongji.edu.cn

收稿日期:2016-06-25