

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.01.01

# 基于模糊综合评价的深圳市暴雨洪涝风险评估

黄国如<sup>1,2,3</sup>, 李碧琦<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

**摘要:** 近年来,城市洪涝灾害的频繁发生已引起专家学者的广泛关注。基于灾害系统理论,综合考虑致灾因子、孕灾环境、承灾体、防灾减灾能力等因素,从危险性和易损性两大风险要素出发,利用 ArcGIS 技术和模糊综合评价法,对洪涝频发的深圳市进行城市暴雨洪涝灾害风险评估区划,最终生成以 100 m × 100 m 为基本评价单元的暴雨洪涝灾害风险分布图。结果表明:深圳市洪涝灾害高风险区主要分布在宝安区西部、福田区、罗湖区西部、龙岗区以及大鹏新区部分地区。研究结果能较好地反映出深圳市洪涝灾害风险的实际分布情况,为有关部门的洪涝灾害风险管理和防灾减灾工作提供较为客观的科学依据。

**关键词:** 城市暴雨洪涝; 模糊综合评价法; 风险评估; ArcGIS; 深圳市

中图分类号:TV122<sup>+</sup>.1; P333.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)01-0001-06

## Risk assessment of storm water flooding in Shenzhen City based on fuzzy comprehensive evaluation method

HUANG Guoru<sup>1,2,3</sup>, LI Biqi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;  
2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;  
3. Guangdong Research Center for Safety and Greenization of Water Conservancy Projects, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In recent years, the frequent occurrence of urban floods has attracted attention from experts and scholars of related fields. The ArcGIS technology and fuzzy comprehensive evaluation method were used to carry out the risk assessment and zoning of urban storm water flood disaster in Shenzhen City which suffers from frequent flooding, based on the factors of risk and vulnerability according to the theory of disaster system. In the analysis, factors such as disaster causing factors, disaster inducing environment, disaster bearing body, the capability of disaster prevention and mitigation were considered comprehensively. Finally the storm water flood disaster risk zoning map was generated with 100 m × 100 m as the basic evaluation unit. The results show that the high-risk areas of flood disasters in Shenzhen City mainly distributed in western Bao'an District, Futian District, western Luohu District, Longgang District and parts of Dapeng New District. The research results can reflect the actual distribution of flood disaster risk in Shenzhen City, therefore it can provide a scientific basis for flood disaster management, prevention and mitigation work of the departments concerned.

**Key words:** urban storm water flooding; fuzzy comprehensive evaluation method; risk assessment; ArcGIS; Shenzhen City

## 1 研究背景

随着全球气候变暖和城市化建设进程不断加快,近年来我国城市暴雨洪涝灾害频发,严重影响人

民群众生产生活,制约城市发展,甚至威胁市民财产和生命安全<sup>[1-2]</sup>。面对日益严峻的城市洪涝问题,城市暴雨洪涝灾害风险评估可以帮助有关部门有针对性地城市暴雨洪涝进行预防和治理,提高城市

收稿日期:2020-08-12; 修回日期:2020-10-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502704),国家自然科学基金项目(51879108)

作者简介:黄国如(1969-),男,江苏南京人,博士,教授,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究。

防涝抗灾能力,降低暴雨洪涝所造成的损失。常用的城市暴雨洪涝风险评估方法有基于历史灾情数据的城市洪涝风险评估、基于指标体系的城市洪涝风险评估和基于情景模拟的城市洪涝风险评估<sup>[3-4]</sup>。其中,基于指标体系的城市洪涝风险评估因其更能体现城市洪涝灾害的连锁性,且具有数据易于获取、建模简便的优点,在城市洪涝风险评估研究中得到广泛应用。Yashon等<sup>[5]</sup>采用层次分析法(AHP)和ArcGIS技术,选用多个指标确定城市洪涝风险指数,对肯尼亚的埃尔多雷特市进行城市洪涝灾害风险评估区划。Lyu等<sup>[6]</sup>构建地铁淹没风险评估指标,运用层次分析法(AHP)和区间层次分析法(I-AHP)对广州地铁系统中的淹没风险进行评估,结果表明超过50%的地铁线路极易遭受洪涝淹没风险,广州地铁系统易受洪涝灾害影响。扈海波等<sup>[7]</sup>建立自下而上的城市暴雨积涝风险指标体系,对北京地区进行积涝风险分析,结果表明风险评估结果与积涝的实际发生情况较为接近,该方法能较好地满足风险评估、区划及风险预警的要求。雷享勇等<sup>[8]</sup>根据暴雨洪涝灾害特征选择多个暴雨洪涝风险指标,基于ArcGIS技术和模糊综合评价法,选取杭州市主城区进行暴雨洪涝灾害风险评估区划,最终生成杭州市暴雨洪涝灾害风险分布图。

深圳市地处东南沿海,属亚热带海洋性气候,暴雨发生频率高、影响面广,暴雨洪涝灾害成为深圳市发生频率较高、影响较大的自然灾害<sup>[9]</sup>。因此,本文以深圳市为研究区域,采用模糊综合评价法,开展深入的洪涝灾害风险评估研究,以为深圳市暴雨洪涝灾害风险管理措施提供理论基础,为防汛部门的防灾减灾策略提供科学依据。

## 2 研究区概况

深圳市位于广东省南部,珠江口东岸,濒临南海,陆域平面形状呈东西宽、南北窄的狭长形。全市面积1 997.47 km<sup>2</sup>,下辖9个区和1个新区(图1),境内地势东南高、西北低,河流众多、水系短小,根据水系及地形特点分为9大流域。深圳市地处北回归线以南,属亚热带海洋性气候。夏季历时长,冬季不明显,气候温和,光照充足。雨量充沛,降雨强度大,时空分布不均,平均年降水量1 933.3 mm,每年4-9月为雨季,汛期降水量约为全年的85%,日照时长2 120.5 h。夏季受热带气旋控制,盛行东南风和西南风。自20世纪90年代开始,深圳市便成为内涝重灾区,1993-1994年深圳市连续发生了4次水灾<sup>[10]</sup>。据深圳市应

急管理局统计,2000-2018年,深圳市共发生36起影响较大、损失较重的暴雨洪涝灾害。如2014年的“3·30”、“5·8”、“5·11”、“5·17”、“5·20”5场特大暴雨在深圳各区造成了一定程度的洪涝灾害,道路积水堵塞,工厂、商铺和居民小区受淹,多处河堤水毁,造成巨大的经济损失,严重影响了市民生产生活<sup>[11]</sup>。因此,对深圳市开展城市暴雨洪涝灾害风险评估十分必要。

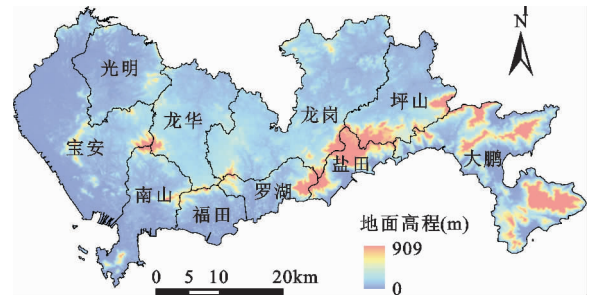


图1 深圳市行政区域划分图

## 3 数据收集与处理

以深圳市为研究区域,根据城市暴雨洪涝灾害系统理论,遵循科学性、系统性、代表性、可行性等原则,综合考虑致灾因子、孕灾环境、承灾体、防灾减灾能力等因素,从危险性和易损性两大风险要素出发共选取12个指标,构建深圳市暴雨洪涝灾害风险评估体系,如表1所示。具体如下:

(1)致灾因子。致灾因子通常包括雨强、历时、频率等,选取区域内观测时间较长的12个站点的1971-2010年日降水数据计算极端气候指标极强降水量 $R_{99}$ (日降水量>99%的总降水量)和强降雨频率(日降水量在50 mm以上的年平均降雨次数),在ArcGIS平台上采用克里金插值法进行插值,得到全市的极强降雨量和强降雨频率分布图。

(2)孕灾环境。孕灾环境中影响洪涝灾害致灾因子强度的因子特征包括地形条件、河流水系、下垫面属性等,深圳市地形复杂,地貌类型多样,河流众多,土地变化剧烈,选取地面高程、坡度、河网密度和径流系数等因子。河网密度指每个1 000 m×1 000 m格网内的河流长度与格网面积的比值;径流系数由土地利用类型确定<sup>[12]</sup>,土地利用类型数据使用全球生态环境遥感监测年度报告提供的2015年全球30 m土地覆盖数据。

(3)承灾体。承灾体主要指暴雨洪涝灾害作用的对象,除了自然方面的因素,洪涝灾害造成的影响还取决于社会属性。同级别的洪涝灾害对人口密

布、经济发达的地区所造成的损失往往比人口稀疏、经济落后的地区更大。选择 GDP 密度、人口密度、建筑密度和老年人口(60 岁以上人口)比重等指标。

(4) 防灾减灾能力。防灾减灾能力主要是指防御暴雨洪涝灾害的能力。本文选用人均 GDP 和排水管网密度等指标体现区域防灾减灾能力。

表 1 深圳市城市洪涝风险指标体系构建

准则层	指标层	方案层	数据来源
危险性	致灾因子	极强降水量/mm	深圳市 1971 - 2010 年日降雨数据
		强降雨频率/d	深圳市 1971 - 2010 年日降雨数据
	孕灾环境	地面高程/m	地理空间数据云
		坡度/(°)	根据高程数据计算得到
易损性	承灾体	河网密度/(km · km <sup>-2</sup> )	根据深圳市水系图计算得到
		径流系数	全球生态环境遥感监测年度报告
	防灾减灾能力	GDP 密度(2015 年)/10 <sup>4</sup> (元 · km <sup>-2</sup> )	中国科学院资源环境数据中心
		人口密度(2015 年)/(人 · km <sup>-2</sup> )	中国科学院资源环境数据中心
		建筑密度(2015 年)/%	中国科学院资源环境数据中心
		老年人口比重(2015 年)/%	福田区人口老龄化状况评价研究 <sup>[13]</sup>
		人均 GDP(2015 年)/10 <sup>4</sup> 元	深圳市年鉴
		排水管网密度(2015 年)/(km · km <sup>-2</sup> )	深圳市排水管网规划

### 4 模糊综合评价

模糊评价法理论来源于模糊数学,最早源于美国加州大学 Zadeh 教授提出的模糊集合概念,模糊集合通过隶属度函数,可以将对象的模糊性加以量化,对其做出合理的评价<sup>[14]</sup>。相较于传统的评价方法,模糊数学的概念和方法更适用于具有模糊特性的风险,因此使用模糊数学建立洪涝风险模糊评估模型,比传统的评价方法更能符合实际情况<sup>[15]</sup>。

洪涝灾害风险空间模糊综合评价模型以 GIS 栅格数据中的 100 m × 100 m 栅格单元为基本评价单元,通过确定各栅格单元单因素评价指标的隶属度函数,逐栅格进行模糊综合评价,获得整个研究区域的模糊综合评价结果<sup>[16]</sup>。建立步骤如图 2 所示。

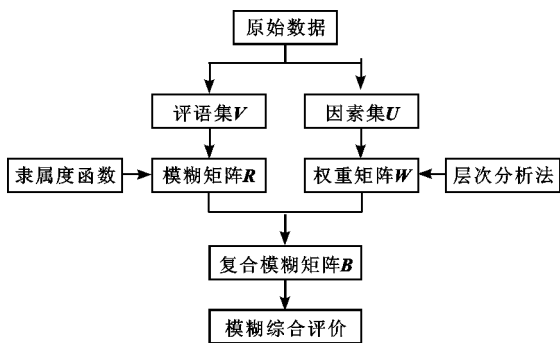


图 2 模糊综合评价法流程

具体为:(1) 建立洪涝风险的因素集  $U$ ,即城市暴雨洪涝风险评价指标体系,确定各因素的权重,构造权重矩阵  $W$ ;(2) 建立评语集  $V$ ,划分评价等级;(3) 构造隶属度函数,根据隶属度函数求出模糊矩阵  $R$ ;(4) 根据各指标的权重和隶属度矩阵得出复合模糊矩阵  $B$ 。

#### 4.1 计算指标权重矩阵 $W$

因素集是指评估对象的影响因素。结合深圳市洪涝事件降雨特点、工程概况并参考相关研究<sup>[17-18]</sup>,综合考虑表 1 所示的 12 个影响因子作为因素集,设洪涝灾害风险的因素集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{12}\}$ ,并将各影响因子空间分布图层栅格化,栅格大小为 100 m × 100 m。以极强降水量栅格数据为例,如图 3 所示。

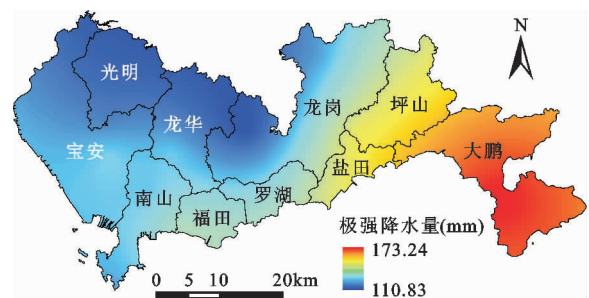


图 3 深圳市极强降水量因子栅格数据空间分布

权重系数矩阵  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  是指各评

价因子对风险性的影响程度大小的集合,模糊综合评价法常通过层次分析法确定各评价因子权重。利用传统层次分析法确定各指标权重的方法构建两两判断矩阵时,常因矩阵构建者的不同而出现差异,具有一定的主观性,使分析结果趋于不稳定。为使得到的权重值更加合理,本文使用熵值法改进层次分析法<sup>[19]</sup>,求得的深圳市暴雨洪涝风险评估各指标权

重见表2。

#### 4.2 划分评价等级

将每个评价因子分为5个级别,建立评语集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_5\}$ , 分别对应低风险、较低风险、中等风险、较高风险、高风险。各评价因子的上限值取最大值,下限值取最小值,采用自然间断点法为各评价因子选取5个分割点,结果见表2。

表2 各评价因子权重及评价等级分割点

评价因子	权重	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	范围值
极强降水量/mm	0.1472	120.87	129.92	139.47	150.23	161.49	110.83 ~ 173.24
强降雨频率/d	0.0736	7.36	8.17	9.12	10.13	11.07	6.76 ~ 12.03
地面高程/m	0.1178	309.90	113.51	49.12	28.02	12.10	0 ~ 909
坡度/(°)	0.0536	26.98	17.92	12.23	7.06	2.92	0 ~ 52.14
河网密度/(km · km <sup>-2</sup> )	0.0946	0.17	0.50	0.88	1.31	1.79	0 ~ 2.30
径流系数	0.1132	0.37	0.50	0.62	0.73	0.86	0.30 ~ 1
GDP密度/10 <sup>4</sup> (元 · km <sup>-2</sup> )	0.0770	5491	9118	12906	16133	25406	0 ~ 54630
人口密度/(人 · km <sup>-2</sup> )	0.1025	2840	5081	9416	16739	25856	0 ~ 38111
建筑密度/%	0.0385	10.97	29.76	48.97	66.60	81.88	0 ~ 100
老年人口比重/%	0.0308	3.13	3.67	4.14	5.96	7.31	2.90 ~ 8.85
人均GDP/10 <sup>4</sup> 元	0.0962	23.30	20.39	13.25	11.09	9.43	9.43 ~ 30.61
排水管网密度/(km · km <sup>-2</sup> )	0.0550	6.80	6.10	4.26	3.89	3.10	3.88 ~ 9.18

#### 4.3 建立模糊矩阵 $R$

在城市暴雨洪涝风险的因素集  $U$  与评语集  $V$  之间进行单因素评价,建立模糊关系矩阵  $R$ :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $r_{ij}$ 为因素集  $U$  中第  $i$  个因素  $u_i$  对应评语集  $V$  中第  $j$  个等级  $v_j$  的相对隶属度,选择较为常见的升、降半梯形和三角形分布函数来确定各指标对各等级的隶属度。其中最低风险度和最高风险度选择升、降半梯形函数,中间3级为三角形分布函数,如分段函数式(2) ~ (4)所示,分段隶属函数的图像见图4。

$$r_n = \begin{cases} 1 & (x \leq a_1) \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1} & (a_1 < x \leq a_2) \\ 0 & (x > a_2) \end{cases} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x - a_{j-1}}{a_j - a_{j-1}} & (a_{j-1} < x \leq a_j) \\ \frac{a_{j+1} - x}{a_{j+1} - a_j} & (a_j < x \leq a_{j+1}) \\ 0 & (x \leq a_{j-1} \text{ 或 } x > a_{j+1}) \end{cases} \quad (3)$$

$$r_n = \begin{cases} 0 & (x \leq a_4) \\ \frac{x - a_5}{a_5 - a_4} & (a_4 < x \leq a_5) \\ 1 & (x > a_5) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x_i$ 为某评价因子的实际值; $a_j$ 为相应级别的临界值。

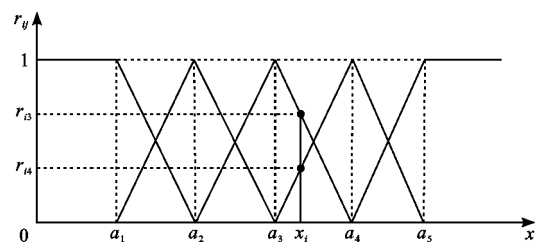


图4 分段隶属函数图像

#### 4.4 模糊综合评价

利用模糊数学的运算法则,对  $W$  与  $R$  进行计算,得到复合模糊矩阵  $B$ ,即:

$$B = W \times R = (w_1, w_2, \dots, w_{12}) \times$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{121} & r_{122} & \cdots & r_{125} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_5) \quad (5)$$

对复合模糊矩阵  $B$  进行比较,根据最大隶属度原则<sup>[20]</sup>,选择  $\max(b_1, b_2, \dots, b_5)$  作为风险评价等级的评判依据,确定风险等级。

## 5 城市洪涝风险评估

基于上述步骤,在 ArcGIS 软件 Spatial Analyst 模块支持下,利用地图代数功能得到研究区每个栅格单一指标对 5 个等级的隶属度值,再根据确定的指标权重,使用地图代数功能计算  $b_j = \sum_{i=1}^n w_i r_{ij}$  得到 5 个评判结果图层;最后,根据最大隶属度原则确定风险指数,确定每一栅格单元风险指数的风险等级<sup>[21]</sup>。

最终得出的基于模糊评价法的深圳市洪涝灾害风险分布见图 5。

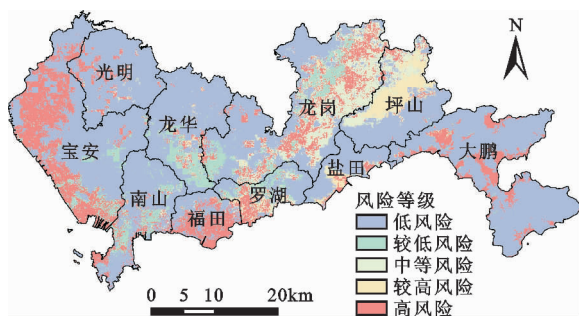


图 5 深圳市洪涝灾害风险分布

从图 5 可以看出,高风险区主要分布在宝安区西部、福田区、罗湖区西部、龙岗区和大鹏新区。较高风险区主要分布在坪山区和盐田区,中等风险区主要分布在龙岗区和龙华区,较低风险区多分布在宝安区东部、龙岗区、南山区和龙华区南部。深圳市洪涝灾害风险高值区分布有集中连片的特点,各个区域的风险主导因素也各有不同,其中宝安区西部地处滨海平原,地势较为低平,同时西部聚集大量工业制造业园区,多为建成区,排水系统不完善,因此以高危险性和高易损性为其主要原因。福田区是深圳市的中心城区,是深圳市原经济特区内的 4 区之一,也是深圳市委市政府所在地,建筑、人口高度密集,不透水地表比例非常高,城市建设与排水体系不配套,因此该区域以高易损性为主导。罗湖区情况与福田区类似,地势东北高、西南低,南面隔深圳河与香港的新界北区相望,是深圳市内最早建成区,经过 40 年的高速发展,人口和财富大量聚集在罗湖区,同时,由于开发较早,罗湖区人口老龄化趋势较为明显,因此该区以高易损性为主导。龙岗区为极端降水高值区,城区分布于临河谷地平原,原为大工

业区,产业集中,不透水比例高,以致灾因子高危险性和高易损性为主导。东部大鹏新区距离海洋较近,海洋气候显著,为极端降水高值区,新区属于新开发区,区内多为山地,建成区面积较小,虽然相对全市而言属于降水高值区,但受经济社会发展因素的限制,大部分地区洪涝灾害风险等级为最低或较低。建成区多位于地势低平区域,建筑、人口和财富的分布较为集中,基础设施尚未完善,一旦受到暴雨袭击,洪涝损失较为严重,以致灾因子高危险性和高易损性为主导。

与深圳市应急管理局提出的 2019 年深圳市防汛预案中的易涝区域进行对比,防汛预案中提到的宝安区西部(福海、松岗、沙井街道)、龙岗区中心的龙岗街道和北部的坪地街道、坪山区和宝安区西部、南山区前海等地面高程较低的片区均属于本文洪涝灾害风险评估结果中的以危险性为主导的较高风险和高风险区,两者较为一致。

在上述深圳市洪涝灾害风险评估的基础上,可以从不同方面有针对性地考虑风险减缓和风险管理措施:(1)积极建设和维护城市排水、防洪防涝工程体系,对发生损坏或排水能力不足的相关设施进行维修与更新;(2)合理发展雨洪利用技术,维持城市流域滞水、蓄水的功能,提高城市防洪韧性,为未来的长期规划预留提升空间和可能;(3)逐步完善新老城区防灾减灾基础设施建设,既不能贪快随意建设新城,也不能忽略旧城区的战略部署;(4)科学进行城市规划,通过合理规划建设城市基础设施和建筑,调整人口分布,改善人口结构,未来城市发展规划应避免开出现有的洪涝灾害风险高值区;(5)编制科学、完善的防灾、减灾预案与应急避难手册,建设有效的疏散系统,强化灾害风险教育,提高城市防洪应急管理水平。

## 6 结 论

(1)针对深圳市洪涝灾害特征,从危险性和易损性两个准则层中选取 12 个风险评估指标,建立深圳市暴雨洪涝灾害风险评估指标体系。以  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  栅格为评估基本单元,采用模糊综合评价法进行深圳市洪涝灾害风险评价,并在 ArcGIS 中绘制深圳市洪涝灾害风险分布图。

(2)深圳市洪涝灾害高风险区主要分布在宝安区西部、福田区、罗湖区西部、龙岗区以及大鹏新区部分地区。深圳市洪涝灾害风险高值区分布有集中连片的特点,不同区内的风险主导因素不一,其中宝

安区西部的高风险值由高危险性和高易损性主导,福田区和罗湖区西部的高风险值由高易损性主导,东部的龙岗区和大鹏新区的高风险值由致灾因子高危险性和高易损性主导。

(3)在深圳市洪涝灾害风险分析与评估的基础上,建议深圳市针对性地制定防灾减灾和风险管理措施,积极建设与维护城市防洪排涝系统,逐步完善旧城区与新城防减灾基础设施建设,进行科学的城市规划,建设有效的应急防灾体系,最大程度降低洪涝灾害风险。

#### 参考文献:

- [1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016,27(4):485-491.
- [2] 程晓陶,李超超. 城市洪涝风险的演变趋向、重要特征与应对方略[J]. 中国防汛抗旱, 2015,25(3):6-9.
- [3] 张冬冬,严登华,王义成,等. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J]. 灾害学, 2014,29(1):144-149.
- [4] 赵思健,黄崇福,郭树军. 情景驱动的区域自然灾害风险分析[J]. 自然灾害学报, 2012,21(1):9-17.
- [5] YASHON O, RYUTARO T. Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: Methodological overview and case study assessment [J]. Water, 2014,6(6):1515-1545.
- [6] LYU Haimin, SUN Wenjuan, SHEN Shuilong, 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.
- [7] 扈海波,轩春怡,诸立尚. 北京地区城市暴雨积涝灾害风险预评估[J]. 应用气象学报, 2013,24(1):99-108.
- [8] 雷享勇,陈燕,潘骁骏,等. 杭州市主城区暴雨内涝灾害风险区划[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2019,18(1):105-112.
- [9] 王燕. 深圳市自然灾害风险评估及应对策略研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(6):77-81.
- [10] 仇劲卫,陈浩,刘树坤. 深圳市的城市化及城市洪涝灾害[J]. 自然灾害学报, 1998,7(2):67-73.
- [11] 马晋毅. 深圳市内涝形成原因分析与治涝对策研究[J]. 水利水电技术, 2015,46(2):105-111.
- [12] 张瀚. 气候变化与城市化对珠三角地区城市洪涝灾害风险影响研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- [13] 深圳福田区统计局. 福田区人口老龄化状况评价研究 [EB/OL]. (2017-05-11) [2020-05-25] <http://www.szft.gov.cn/attachment/0/522/522214/3297819.pdf>
- [14] ZADEH L A. Fuzzy sets [J]. Information & Control, 1965,8(3):338-353.
- [15] 王兆卫. 基于模糊评价法的城市洪涝灾害评估研究 [D]. 南京:东南大学, 2017.
- [16] 胡波,丁焯毅,何利德,等. 基于模糊综合评价的宁波暴雨洪涝灾害风险区划[J]. 暴雨灾害, 2014,33(4):380-385.
- [17] 马晋毅. 深圳市内涝形成原因分析与治涝对策研究 [J]. 水利水电技术, 2015,46(2):105-111.
- [18] 吴健生,张朴华. 城市景观格局对城市内涝的影响研究——以深圳市为例 [J]. 地理学报, 2017,72(3):444-456.
- [19] 戴娟,潘益农,刘青,等. 改进的AHP在县域尺度暴雨洪涝风险评价的应用[J]. 气象科学, 2014,34(4):428-434.
- [20] 敬双怡,莘明亮,于玲红,等. 基于模糊综合评价法的大同市山洪灾害风险评价[J]. 水利水电技术, 2018,49(5):84-89.
- [21] 王林森,熊小兰,柯庆,等. 基于GIS空间分析建模技术的内涝风险评估[J]. 中国给水排水, 2017,33(3):115-118.