

高凯, 杨志勇, 高希超, 等. 城市洪涝损失评估方法综述[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(4): 57-68.

GAO Kai, YANG Zhiyong, GAO Xichao, et al. A Review of the Evaluation Methods of Urban Flood Loss [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(4): 57-68.

城市洪涝损失评估方法综述

高凯^{1,2}, 杨志勇^{1,2}, 高希超^{1,2}, 邵薇薇^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 城市化进程的加快使得城市内部与城市间的联系更加紧密, 导致洪涝灾害损失进一步扩大, 严重威胁到城市的生产生活安全。城市洪涝灾害损失评估是国土资源规划与防洪减灾预案制定的依据, 国内外研究学者根据不同类型的洪涝灾害, 应用数值模型、神经网络、遥感技术等各种方法对城市洪涝灾害损失进行了评估。通过对国内外文献的调研, 划分了城市洪涝灾害损失的类型, 整理了针对不同洪涝灾害损失的评估方法及特点, 并根据洪涝灾害不同时段的特点总结出适用的洪涝灾害损失评估方法, 为城市洪涝灾害损失评估研究以及防洪减灾工作提供了参考。有以下几个主要结论: (1) 产业间的联系加强, 城市之间组成联系紧密的城市群, 单个城市发生洪涝灾害, 会通过产业间前后向关联、城市间交通、贸易等扩展到整个城市群, 使得城市洪涝灾害损失范围更广; (2) 在城市洪涝灾害损失评估中, 不同地区不同承灾体的特性及损失率各不相同, 在计算时要结合实际情况选择合适的评估方法合理确定损失率; (3) RS、GIS、神经网络等技术被应用到城市洪涝损失评估中, 使得城市洪涝损失评估精度更高, 评估时间更短, 为预测与应对城市洪涝灾害提供更有力的保障; (4) 随着信息化水平的提高, 可将机器学习、数据挖掘等技术应用到城市洪涝损失评价中, 进一步提高城市洪涝损失评估的时效性, 为防洪减灾工作提供保障。

关键词: 城市洪涝; 损失评估; 直接损失; 间接损失

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.04.006

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU998.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)04-0057-12



听语音
聊科研

A review of the evaluation methods of urban flood loss

GAO Kai^{1,2}, YANG Zhiyong^{1,2}, GAO Xichao^{1,2}, SHAO Weiwei^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

Abstract: The acceleration of urbanization process makes the relationship between the city and the city more closely, which leads to the further expansion of flood disaster loss, which seriously threatens the production and living safety of the city. Urban flood disaster loss assessment is the basis of land and resources planning and flood control and disaster reduction plan. According to different types of flood disasters, domestic and foreign researchers have applied various methods such as numerical model, neural network and remote sensing technology to evaluate urban flood disaster loss. Based on the investigation of domestic and foreign literature, this paper divides the types of urban flood disaster loss, sorts out the evaluation methods and characteristics of different

收稿日期: 2020-05-13

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC1508201); 国家自然科学基金项目(51879274); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室团队项目(SK12020ZY03)

作者简介: 高凯(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: gaok4617@163.com

flood disaster losses , and summarizes the applicable flood disaster loss assessment methods according to the characteristics of different periods of flood disaster , which provides a reference for the research of urban flood disaster loss assessment and flood control and disaster reduction work. The main conclusions of this paper are as follows: (1) When the flood disaster occurs in a single city , it will extend to the whole urban agglomeration through the forward and backward correlation between industries , inter city traffic , trade , etc. , making the loss range of urban flood disaster more extensive. (2) In the loss assessment of urban flood disaster , the characteristics and loss rate of different disaster bearing bodies in different areas are different. In the calculation , it is necessary to select the appropriate assessment method and reasonably determine the loss rate according to the actual situation. (3) RS , GIS , neural network and other technologies are applied to the urban flood loss assessment , which makes the urban flood loss assessment more accurate and shorter , and provides a more powerful guarantee for the prediction and response of urban flood disaster. (4) With the improvement of information technology , machine learning , data mining and other technologies can be applied to urban flood loss evaluation , which can further improve the timeliness of urban flood loss assessment and provide guarantee for flood control and disaster reduction.

Keywords: urban flood; loss assessment; direct loss; indirect loss

0 引言

城市洪涝灾害实质上包括城市洪灾和城市涝灾两种灾害。城市洪灾是指城市所在流域的江、河、湖、水库等水位上涨形成客水入境造成的灾害；城市涝灾是指本地降雨量过大而产生大量积水汇集到城市内低洼地区，城市排水系统不能及时将积水排走而形成的灾害现象^[1]。城市洪灾和城市涝灾的共同点都是城市地表积水过多，区别在于城市洪灾是由客水入境造成，城市涝灾是由本地降水过多造成^[2]。城市洪灾和城市涝灾经常同时发生在同一区域，难以严格区分，故通常统称为城市洪涝灾害^[3]。

不同淹没深度的积水，对应的城市洪涝风险也不相同。王静等^[4]研究了不同国家的洪水风险等级划分，图 1、图 2 为澳大利亚和日本基于淹没水深和流速的洪水危险划分，可以发现不同国家对于洪水危险的划分也不相同，澳大利亚对于成人和儿童划分不同的涉水避难极限曲线，当流速较小时成人涉水深度极限为 1.50 m，儿童涉水深度极限为 0.8 m；而日本则只划分了一条步行安全避难曲线。徐宗学等^[5]基于淹没水深和淹没时间的组合划分了洪涝风险等级，如表 1 所列。

表 1 基于淹没水深和时间阈值法的洪涝风险等级划分标准^[5]

Table 1 Flood risk classification standard based on submergence depth and time threshold method^[5]

风险等级	积水深度/m	积水时间/min	危险程度
红 I	>0.4		城市交通、基础设施和各类建筑物受到威胁
橙 II	[0.3, 0.4)	>15	城市交通受到严重影响
黄 III	[0.15, 0.3)	>30	城市交通不便
蓝 IV	>0.15		一般积水

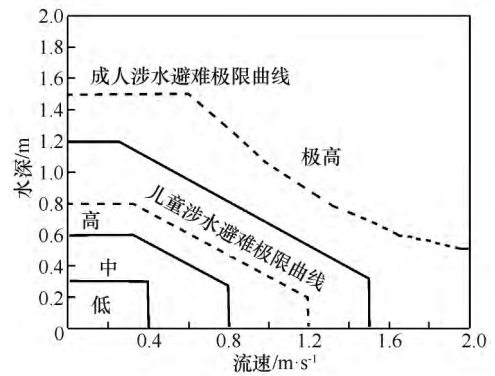


图 1 澳大利亚沿避难路线的洪水危险等级划分^[4]

Fig. 1 Flood risk classification along refuge routes in Australia^[4]

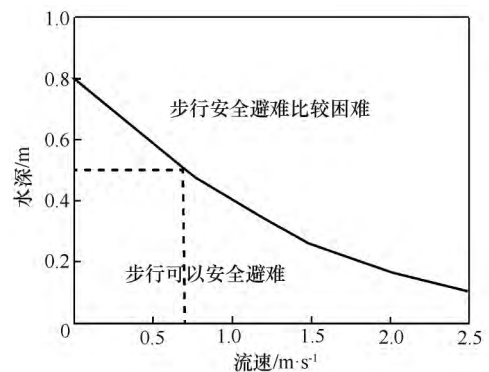


图 2 日本步行避难困难度与水深、流速关系^[4]

Fig. 2 The relationship between the difficulty of pedestrian refuge and water depth and velocity in Japan^[4]

城市洪涝灾害造成的损失比较复杂，除了受灾区域的产业和人口的直接损失，还会造成前后向关联的影响，即受灾区域产业部门受到洪涝灾害的直接影

响,会导致停产或者产量下降,其前向企业将得不到相应的供应,生产受阻;其后向产业的生产得不到完全的消耗,造成产品积压,都是城市洪涝的间接损失^[1-6]。城市化高度发展的今天,城市不再以一个相对独立的个体存在,而是和周围城市组成联系紧密的城市群,所以当城市群中的某个城市发生洪涝灾害,所造成的影响不仅限于该城市,其影响会通过交通、物流、通信、经济往来等扩展到整个城市群,这也是城市洪涝损失中间接损失的考虑范围^[7-8]。

科学准确地评估城市洪涝灾害损失,是制定防洪规划、进行防洪决策和部署防洪救灾行动的重要依据。目前城市洪涝损失评估的研究多是对某种特定的洪涝灾害损失计算方法或洪涝灾害损失评估模型进行介绍并应用于具体案例,对不同时间段(灾前、灾中、灾后)的洪涝灾害损失评估研究较少。因此,本文总结了已有城市洪涝灾害损失评估方法,介绍了不同时间段的洪涝灾害损失评估的特点及方法,为城市防洪减灾工作提供依据。

1 城市洪涝灾害损失分类

国外对城市洪涝灾害损失一般有两个分类标准,第一类标准将洪涝灾害损失分为有形损失和无形损失^[9],其中有形损失是指可以用金钱来评估的损失^[10],而无形损失是指无法用货币量化的洪涝灾害影响^[11]。第二类标准将洪涝灾害损失分为直接损失和间接损失,其中直接损失是指淹没区内洪水直接与人、财产和环境发生物理接触而造成的损失^[12];而间接损失是指由直接经济损失波及带来的损失,不表现为实物形态的损失,揭示未来社会生产的下降程

度^[13]。两个分类标准不是独立存在的,而是相互之间存在一定联系,故又可以进一步将城市洪涝灾害损失分为直接有形损失、直接无形损失、间接有形损失和间接无形损失,具体分类如表2所列。

国内一般将城市洪涝灾害损失分为经济损失和非经济损失^[14]。洪涝灾害经济损失是指因洪水造成的社会经济财产损失,包括直接经济损失、间接经济损失^[15],其中直接经济损失对应国外分类中的直接有形损失,间接经济损失对应国外分类中的间接有形损失。非经济损失是指洪涝灾害造成的无法通过经济指标衡量的损失,对应国外分类中的无形损失。具体分类如表3所列。

对于城市洪涝灾害损失评估,不同学者也从不同角度进行了分类。ELLINGWOOD等^[18]从洪涝灾害评估的范围尺度出发,将洪涝灾害损失评估分三个层次:地方、地区和国家,其中地方评估层次是对洪涝灾害淹没范围内的损失进行评估;地区评估层次是对洪涝淹没区与相邻区域的损失进行评估;国家整体评估层次是对洪水造成的国民整体经济的损失进行评估。MERZ等^[19]根据研究的规模提出了宏观尺度、中尺度和微观尺度的分类方式。王宝华^[15]根据城市洪涝灾害损失评估的时间将其分为洪灾灾前预估、洪灾灾中跟踪评估和洪灾灾后评估三个阶段,其中洪灾灾前预估是预测洪水等级与可能造成的宏观经济损失等;洪灾灾中跟踪评估是对洪水灾害过程实时跟踪,确定成灾地点、洪水强度等,对灾害损失跟踪动态评估;洪灾灾后评估是在洪灾结束后,对受灾区的受灾人口、受灾面积、经济损失等的调查评估。

表2 国外城市洪涝灾害损失分类^[9,11]

Table 2 Loss classification of urban flood disaster in foreign countries^[9,11]

损失类型	有形损失	无形损失
直接损失	损坏私人建筑和内物; 道路、公用设施和通信基础设施; 疏散和救援措施; 淹没区内的营业中断; 清理费用	生命损失; 环境损失; 历史文化损失; 生态产品损失
间接损失	洪涝区外公共服务中断; 对洪涝区外公司造成生产损失; 交通中断成本; 洪涝后公司迁移造成税收损失	心理创伤; 社会混乱; 对当局失去信任; 灾后恢复的不便

表3 国内城市洪涝灾害损失分类

Table 3 Loss classification of urban flood disaster in domestic cities

项目	经济损失		非经济损失
	直接经济损失	间接经济损失	
含义	由于洪水淹没直接造成的损失,揭示已有社会财富的减少,是一个静态概念 ^[16]	由直接经济损失波及带来的损失,不表现为实物形态的损失,揭示未来社会生产的下降程度,是一个动态概念 ^[13]	洪涝灾害带来的生命安全影响、政治社会影响、生态环境影响等无法用经济指标衡量的损失 ^[17]
受灾体类型	居民财产损失、企业资产损失、公共设施损失等	停减产损失、产品挤压损失、投资溢价损失等	政府声誉、社会治安、生态失衡等

2 研究进展

城市洪涝灾害损失评估的方法随着科技的进步不断完善。传统的洪涝灾害统计评估由于承灾体复杂、各类信息不易统计且统计花费大量的时间、人力和物力,不便于城市洪涝灾害的损失评估。基于数学方法的损失评估主要是通过承灾体洪灾损失率模型来计算洪涝损失^[20],损失率模型^[21]方法是以淹没水深、淹没历时为自变量,损失率为因变量,采用回归分析等方法,建立淹没水深等与洪灾损失率的回归方程,美国、加拿大学者提出水深-损失曲线^[22],并考虑了淹没历时和流速,预报时间对损失的影响,进行曲线调整^[23];张金凤^[13-17]应用随机过程的观点,建立财产损失评估随机模型,反映洪灾财产损失率的随机变化情况;VELASCO等^[9]采用一种新的一维二维耦合模型求解洪水深度,并建立了新的阶段性损伤曲线来估算直接有形损伤;涂婷杰^[24]通过水害损失S曲线和数学推导构建了新型水害损失评价模型,并用其估算了2009—2012年长江三角洲的洪涝损失。KOMOLAFE等^[25]建立全球建筑物类型的损失函数,用于估算泰国湄南河流域的洪水经济损失。姚山虎^[26]运用模糊数学方法,通过计算涝灾因子隶属度和权重值,对辽宁省3个典型涝区涝灾程度进行综合评价,评价结果与实际情况吻合的较好。损失率模型方法在城市洪涝损失评估中考虑的因素较少,只考虑了洪水淹没水深变化的影响因素,实用性差;每种财产的损失率也各不相同,通用性差;损失率的确定需要大量的人力、物力现场调查,时效性差。

BP神经网络和SVM可以较好地拟合损失值与影响因素之间复杂的非线性函数关系,输入通常选择的是淹没水深、历时、社会经济状况等影响因素,输出是直接经济损失值^[14]。金菊良等^[27]采用BP算法与遗传算法交替优化神经网络参数,进而建立了洪水灾情评估的神经网络模型,并对河南省进行了实例计算,证明了模型的实用性、客观性和通用性;唐明等^[28]利用遗传程序设计进行了洪水灾害损失评估并实现自动建模,使得洪水灾害评估系统建模具有快速生成和自我更新能力强的特点;黄志伟等^[29]提出了一种适合洪灾评价等级的SVM模型并建立了优化的支持向量机,实现了在一维连续空间中综合评价多维灾情指标的功能。刘小生等^[30]开发了能够快速建立神经网络集成模型的洪水损失评估程序,已在鄱阳湖区某县应用。

随着科技的发展,洪水数值模拟、遥感和GIS技术在洪水灾害评估中得到广泛应用^[31-32],使洪涝灾害评估更加科学、实用,节省大量人力物力,并且时效性更强^[33]。国内外研究整理出一套较为完整的洪涝灾害损失快速评估思路:基于GIS和遥感技术进行洪水模拟,通过构建洪涝灾害要素与洪涝灾害损失的函数关系,估算洪涝灾害的可能损失^[34]。李纪人等^[35]建立了基于空间展布式社会经济数据库的洪涝灾害损失定量评估模型,能够与洪水演进模型和遥感实时监测等手段相结合,并且已经在2003年淮河流域洪涝灾害遥感监测评估等方面得到成功应用;张文婷,刘永志等^[36]基于社会经济空间展布方法和GIS构建了洪水灾害损失快速评估模型,并对福建省长乐市千年一遇风暴潮引起洪水进行灾后损失评估;刘小生等^[37]基于空间信息格网进行了洪灾损失评估研究,建立了基于空间信息格网的洪灾损失评估模型;BEHZAD等^[38]介绍了利用GIS技术开发的城市洪水模型RUFIDAM,该模型在墨尔本东南部的三个城市集水区进行了试验,结果表明RUFIDAM模型能较准确地预测洪灾程度和累积损失。

3 计算方法

由于非经济损失无法用经济指标衡量洪涝灾害影响,国内外研究较少,故本文主要针对经济损失的计算方法进行归纳。

3.1 直接经济损失

城市洪涝灾害直接经济损失的研究相对于间接经济损失的研究更加丰富,评估方法也较多^[7]。刘春腊等^[17]将洪水灾害直接经济损失评估方法概括为5种类型:(1)社会学类型:实地访谈调查统计分析;(2)损失率类型:关系曲线法、财产损失率模型、面上综合损失值模型、损失增长率模型等;(3)网络学类型:神经网络模型、BP神经网络模型、混合式模糊神经网络数学模型;(4)经济学类型:影子成本法、成本收益法;(5)其他类型:系统分析法、不确定性模型等。

其中应用实地调查统计分析的方法进行城市洪涝灾害直接经济损失评估需投入大量人力物力且时效性差;应用损失率类型的方法,建立灾情与淹没深度之间得到关系,可以提高损失评估的时效性,在目前洪涝灾害直接经济损失中应用较广;神经网络模型具有并行计算、自学习等功能,可较好的模拟灾害损失与影响因素之间的复杂非线性函数关系,在模型收敛速度和评估精度方面都取得了较好效果^[39];经济学

表4 直接经济损失计算方法^[14]Table 4 Calculation methods of direct economic loss^[14]

方法	基本思路	方程	特点
实地调查、统计分析	实地调查受灾区域损失情况, 统计分析, 逐级上报	无	有助于研究者形成感性认知, 可作为现代评估方法的补充。但工作量大、时效性差
关系曲线法	综合考虑水深、淹没历时、水流速度以及预报时间等城市洪涝因素, 建立城市洪涝因素与财产和损失之间的函数关系, 进行水灾直接经济损失评估	$y=f(x)$ 式中, y 为城市洪涝直接经济损失; x 为淹没水深、淹没历时、水流速度等城市洪涝因素之一; $f(x)$ 为 x 的单增函数	对于洪水灾害评估比较迅速, 尤其是平均水深-损失曲线法比较适合计算特大洪水时的经济损失 ^[16] 。但考虑因素单一, 不能细化至各类财产的损失
财产损失率模型	以淹没水深、淹没历时为自变量, 损失率为因变量, 利用回归分析等方法, 建立淹没水深等与洪灾损失率的回归方程	$S_D = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L \beta_{ijk}(h, t) V_{ijk} = \sum_{j=1}^M S_{Dj}$ 式中, S_D 为洪灾损失率计算的一次洪灾引起的直接经济损失值; S_{Dj} 为第 j 类财产的直接经济损失值; β_{ijk} 为第 k 种淹没程度下第 i 个经济分区内第 j 类财产的损失率, 它是淹深度 h 和淹没持续时间 t 的函数; V_{ijk} 为第 k 种淹没程度下第 i 个经济分区内第 j 类财产值; N 为淹没区内按经济发展水平划分的分区数; M 为第 i 个经济区内的财产种类; L 为淹没程度等级数 ^[42]	此模型具有计算量大、大多只考虑淹没水深这一影响因素、实际操作复杂、精度低等缺陷, 因此该模型难以对直接经济损失作出较为精确的定量评估 ^[13]
面上综合损失值模型	采用某一价格水平年的人均损失来预估城市区域的洪涝灾害经济损失值(同时考虑物价上涨因素)	$R = A \cdot Y \cdot (1 + K)^n$ 式中, A 为洪涝灾害受灾人口; Y 为历史洪涝灾害的公顷均损失; K 为物价上涨率; n 为距离调查历史洪涝灾害的年数 ^[13]	简单易行、操作方便, 损失率的概念比较清楚, 从整体上把握和刻画了洪涝灾害的损失问题, 是一种较好的宏观计算方法。但在洪涝灾害损失的影响因素上考虑的不够详细 ^[41]
损失增长率模型	考虑受灾财产种类、各类财产洪灾损失率、所在地区经济发展水平以及资金和财产值随时间的变化情况, 把不同年份的洪涝灾害损失换算到同一基准年	$C_{in} = C_{i0}(1 + Y_i)^n$ 式中, C_{in} 为第 i 种资产(或人口)在第 n 年的预测值; C_{i0} , Y_i 分别为第 i 种资产(人口)基准年的值和年均增长率 ^[43]	可把不同年份的洪涝灾害损失换算到同一基准年, 以便进行经济比较 ^[13]

分析方法更加适用于考虑时间以及经济发展水平的洪涝灾害直接经济损失评估^[40]。表4为应用较广的几类直接经济损失计算方法。

3.2 间接经济损失

城市洪涝灾害的间接经济损失主要包括: 停产或减产的经济损失、产业关联性间接经济损失、投资溢价损失等^[44]。洪涝灾害间接经济损失评估方法有很多, 最传统的是直接调查估值法, 但该方法需要投入大量人力物力。李春华、姜玲等^[44]根据间接经济损失的界定视角不同, 把洪涝灾害间接经济损失的评估方法分成两大体系, 基于存量-流量方法体系和基于投入-产出方法体系, 其中基于存量-流量方法体系的方法包括: 比例系数法、模拟法和系统动力学方法; 基于投入-产出方法体系的方法包括: 经济增长模型法^[45]、投入产出法^[46]和可计算一般均衡方法^[47]。在洪涝灾害损失评估中应用较广的方法是比例系数法和投入产出模型法。表5为间接经济损失评估方法。

3.3 综合方法

除了上述对城市洪涝灾害的直接经济损失评估与间接经济损失评估外, 还有很多评估洪涝灾害损失的综合方法。

3.3.1 空间信息格网模型

前述城市洪涝灾害损失评估方法中用到社会经济数据, 这些数据是按照行政区域进行统计, 而城市洪涝淹没范围一般是不规则的, 一次洪水可能淹没行政区域内的一部分, 故采用整个行政区域作为评估单元存在受淹区社会经济指标计算的不合理性和洪水分布特性的不合理性问题^[48]。

为了解决上述问题, 专家学者们提出了GIS空间信息单元格网模型, 对淹没范围进行离散化处理, 得到洪水特性线网, 在一个洪水特性网格单元内, 近似认为水深是相等的^[49]。单元网格大小可以通过将遥感影像得到的淹没范围叠加DEM后, 根据水深分布的变化情况确定^[50]。对于行政单元内社会经济信息也是不均匀的问题, 可以利用社会经济空间展布方法,

表 5 间接经济损失计算方法^[44]Table 5 Calculation methods of indirect economic loss^[44]

体系	方法	基本思路	间接损失评估的关键	特点
基于存量— 流量	比例系数法	将各行业洪涝灾害直接经济损失值乘以间接经济损失影响系数得到各行业的间接经济损失值, 再汇总得到洪涝灾害间接经济损失	直接损失评估及与间接经济损失系数的分析	计算简单、时效性强。但影响因素单一, 认为洪涝灾害间接经济损失仅与直接经济损失有关
	系统动力学法	综合考虑生产系统的延迟、动态变化、不确定性、可变的生产系数关系、投入产出的非线性等因素, 应用系统动力学模型进行洪涝灾害间接损失评估	存量损失及速率变量之间的反馈关系	可以很好地描述灾后经济特征以及经济系统中的投入产出结构
基于投入— 产出	经济增长模型法	考虑国民生产总值、国民收入的增加或人均国民生产总值、人均国民收入的增加等因素, 应用经济增长模型进行城市洪涝灾害损失评估	生产函数的建立	考虑了动态经济增长变化
	投入产出法	从产业部门的供给和需求角度切入, 得出洪涝灾害对城市各部门造成的直接损失后, 利用投入产出模型分析由其所形成的间接损失	部门的划分及投入产出表的建立	能从产业角度较为有效地评估洪涝灾害的间接经济损失。但没有很好地考虑城市洪涝灾害过程中资源的损耗成本
	可计算一般均衡方法	将水资源作为一种生产要素或者一个部门、一个约束纳入到模型中, 考察水资源和社会经济系统之间的相互影响关系, 并得出定量的评估结果。	社会核算矩阵表的建立及参数标定	考虑了各行为主体的经济行为, 真实地刻画洪涝灾害冲击在不同经济部门和宏观经济方面的传导机制。但对数据要求十分高, 需收集流域内部行政区数据, 并更新投入产出表, 在这个过程中将带来一定数据误差, 可能影响到模拟结果的准确性

解决社会经济统计数据在空间上分布的合理性问题, 得到社会经济数据空间展布信息^[49]。将洪水特性单元与社会经济单元叠加得到可以进行洪涝灾害损失计算的单元格, 称之为洪水损失计算 GIS 空间信息单元格^[51]。

基于 GIS 空间信息格网的洪涝灾害损失评估主要考虑各承灾体现有固定资产的损失和停工停产造成的产值损失, 固定资产的损失通过考虑各行业的固定资产损失率来确定, 产值的损失则是通过淹没历时计算由于停工停产造成的损失^[35]。对洪水特性主要考虑水深、淹没历时和预警时间等因素, 洪涝灾害损失评估模型为^[48]

$$W = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m \delta_i A_{ij} \eta_{jkm} + \sum_i \sum_j \delta_i B_{ij} \cdot D / 365 \quad (1)$$

式中, δ_i 为空间信息格网单元类型系数; A_{ij} 为第 i 洪水单元、第 j 行业固定资产数(万元); η_{jkm} 为第 j 行业、第 k 级水深、第 m 级淹没历时损失率; B_{ij} 为第 i 洪水单元、第 j 行业年产值(万元/年); D 为淹没时间天数。其中 δ_i 满足

$$\delta_i = \begin{cases} 1, & \text{单元类型为耕地、居民地、城市用地等} \\ 0, & \text{单元类型为其他(包括未利用土地和原水体等)} \end{cases} \quad (2)$$

3.3.2 模糊综合评估方法

模糊综合评价法是根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价, 即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价, 它具有结果清晰, 系统性强的特点, 能较好地解决模糊的、难以量化的问题, 适合各种非确定性问题的解决^[52], 城市洪涝灾害损失评估就是典型的非确定性问题。由于人们对城市洪涝灾害损失的形成因素不完全明确、对各个影响因素之间的关系不完全清楚、各个因素对于洪涝灾害损失的作用也不完全明了, 所以城市洪涝灾害损失评估是一个信息不完全的灰色系统^[53]。城市洪涝灾害损失兼有灰色系统与模糊系统的特征^[54]。因此, 将灰色系统理论与模糊数学相结合, 运用于灾害损失评估, 将是一种行之有效的评估方法。

城市洪涝灾害损失评估的灰色模糊综合方法就是用灰色系统理论方法选择评定因素, 确定权重集, 然后再进行模糊综合评判, 估算出灾害损失的程^[55-56]。

3.3.3 基于神经网络的洪涝灾害损失评估方法

神经网络由于其具有自组织、自学习和对输入数据或规则的鲁棒特性、冗余容错特性, 非常适合用于求解影响因素复杂且难以用数学公式表达的实际问题, 作为一种快速定量化分析模型, 近年来在洪涝灾

害损失评估中被广泛采用^[57]。在应用其来解决洪涝灾害评估问题时, 由于洪涝灾害损失和其特征要素之间更多的是存在相关关系, 而非确定的函数关系, 故人工神经网络的输入节点变量可以定义为洪涝灾害评估的各个影响因子, 且不必通过具体的函数表达式, 仅通过连接权重来直接建立因变量和自变量之间的非线性关系^[46]。神经网络模型可较好地拟合损失率与影响因素之间复杂的非线性函数关系, 在模型收敛速度和评估精度方面都取得了较好效果^[17]。

应用人工神经网络计算洪涝灾害损失的基本原理, 是选择合适的网络结构, 将历史洪涝灾害的相关雨情、水情、工情、社会经济情况及其所对应的灾害损失构成网络的训练模式队, 通过对网络进行训练, 得出流域或地区洪涝灾害损失的预报网络。该网络用于未来灾害损失的快速诊断和评估, 为灾情统计和制定灾后重建计划奠定必要的基础^[23-24]。

4 城市洪涝灾害损失评估过程

根据洪涝发生的阶段和过程的不同, 城市洪涝灾害损失评估可分为灾前预估、灾中跟踪评估和灾后评估, 各个阶段城市洪涝灾害损失评估的目的、内容与方法各有不同, 以下对各个阶段分别讨论。

4.1 灾前预估

洪涝灾害损失灾前预估是通过对未来某一地区洪涝发生的可能性、洪水强度、洪水淹没深度等参数以及洪涝发生后可能造成损失的预估, 为防洪减灾措施和决策方案的制定提供依据。灾前预评估需要考虑的因素既包括历年洪涝灾害的灾后损失调查结果, 也包括当地的社会经济发展程度等^[15]。灾前预估主要是对洪涝灾害进行宏观的预测, 其评价方法主要包括: 历史灾情调查分析、模型模拟法、洪水风险图^[59-60]、基于 GIS 的模拟方法、关系曲线法、空间信息格网模型等, 具体如下。

(1) 通过模型模拟法预测不同暴雨强度下可能发生洪涝灾害的强度、淹没范围、淹没深度等, 再通过

洪涝灾害损失评估模型进行损失评估, 为制定防汛预案等提供依据。

(2) 根据历史灾情调查分析以及系统动力学模型等, 预测对应洪涝灾害强度下的淹没范围与淹没深度, 通过系统动力学模型进行洪涝灾害损失评估, 为制定防汛预案等提供依据。

(3) 将洪水淹没范围、淹没深度等数据带入到 GIS 中, 并结合空间信息格网模型分析淹没地区具体对应的可能受灾对象, 进行城市洪涝灾害损失评估, 为制定防洪减灾与决策方案等提供依据。

(4) 通过不同受灾对象、淹没范围、淹没深度等, 采用不同受灾对象所对应的关系曲线法在宏观上预测洪涝灾害可能造成的经济损失, 为制定防洪减灾与决策方案等提供依据。

4.2 灾中跟踪评估

洪涝灾害灾中跟踪评估是在洪涝灾害发生时, 对洪水灾害过程进行动态损失评估, 为防汛措施与应急预案的制定与调整提供依据, 使得救灾行动更具有针对性, 将损失尽可能降到最低。评估内容主要是根据监测系统和人工上报等, 跟踪灾害的发展情况, 确定受灾地点、洪水强度、实时灾情, 以及已造成的灾害损失等^[48]。灾中评估最主要的是真实性和时效性, 结合洪涝灾害实时的真实情况快速的做出评估, 其评价方法主要包括: 空间信息格网模型, 基于 RS 和 GIS 的评价方法, 基于神经网络的评价方法等, 具体如下。

(1) 通过遥感监测、人工上报等获得实时洪涝灾害情况, 包括淹没范围变化、淹没深度变化、淹没地区情况等, 为应急方案的制定与调整提供依据。

(2) 结合空间信息格网模型和 GIS, 分析洪涝灾害进一步发展的可能性, 得到淹没地区的各项洪涝灾害特征参数, 为洪涝灾害损失评估和应急方案的制定与调整提供依据。

(3) 采用基于神经网络的洪涝灾害损失评价方法, 快速评价洪涝已经造成的各种损失, 为应急方案的制定与调整提供依据。

表6 综合方法对比^[16]

Table 6 Comparison of synthesis methods^[16]

方法	基本思路	特点
空间信息格网模型	将洪水特性单元网格和社会经济网格叠加得到空间信息格网, 应用于城市洪涝灾害损失评估	解决社会经济统计数据在空间上分布的合理性问题, 得到社会经济数据空间展布信息 ^[48]
可变模糊评价方法	利用相对差异函数表征受灾区域与灾情等级间的吸引性与排斥特性, 利用有序二元比较方法确定各灾损指标权重, 量化表征灾害损失 ^[16]	具有结果清晰, 系统性强, 能较好地解决模糊的、难以量化的问题
基于神经网络的洪涝灾害损失评估方法	采用 BP 神经网络结构, 构造洪涝灾损失计算的人工神经网络, 进行城市洪涝灾害损失评估	具有自学习、联想记忆功能, 并具有分布式、并行性和高度鲁棒性等特点 ^[58]

4.3 灾后评估

洪涝灾害灾后评估是在洪涝事件发生后, 对受灾地区各类损失的详细评估, 包括受灾区的受灾人口、受灾面积、直接经济损失、间接经济损失以及洪涝灾害对生态和社会的影响等。灾后评估的作用主要有两个, 一是指导灾后恢复重建、灾害损失补偿以及洪涝灾害损失保险理赔等工作; 二是为应对将来发生类似洪涝灾害提供指导依据^[48]。灾后损失最主要的是真实性和精确性, 其评价方法包括: 空间信息格网模型、基于 RS 和 GIS 的评价方法、基于指标的评价方法^[33]、基于神经网络的评价方法、统计调查法等, 具体如下。

(1) 通过 RS 和 GIS 以及现场调查, 获得淹没区域内各个受灾对象的受灾情况, 计算洪涝灾害灾损失, 为灾后重建等提供依据。

(2) 通过空间信息格网模型, 获得淹没区域的各种洪涝参数、受灾对象的参数以及淹没区域的经济参数, 再利用洪涝灾害损失评估模型进行损失评估, 为灾害损失补偿、洪涝灾害损失保险理赔等工作提供依据。

(3) 采用基于指标的评价方法, 分别评价各类受灾对象的损失, 为灾害损失补偿、洪涝灾害损失保险

理赔等工作提供依据。

(4) 最后将各个地区的损失情况逐级上报, 进行汇总编制成防汛预案, 为将来发生类似洪涝灾害的处置提供指导依据。

4.4 城市洪涝损失评估步骤

城市洪涝不同时段洪涝损失评估的目的、内容和方法不同, 但是计算步骤基本一致, 主要包含三个步骤:

(1) 获得洪涝信息。通过模拟预测、遥感、GIS 等技术获得城市淹没深度、淹没范围、淹没时间等洪涝信息。

(2) 计算承灾体损失率。根据步骤 (1) 获得的洪涝信息计算不同承灾体的损失率。损失率的确定方法有多元回归分析法、逐步回归分析法和洪灾损失率综合值计算法等^[61]。不同地区由于当地特征参数不同, 导致不同承载体损失率也不相同。如表 7 为朱留军^[62]以河南省新乡市为研究区域, 计算的不同水深情况下当地不同承载体对应的损失率。

(3) 城市洪涝损失评估。根据不同时段城市洪涝损失评估的目的及特点, 选择不同的洪涝灾害损失评估方法进行城市洪涝损失评估。表 8 为不同时段城市洪涝损失主要评估方法。

表 7 不同承载体损失率与淹没水深的关系^[62]

Table 7 Relationship between loss rate of different carriers and submerged depth^[62]

水深/m	0~0.5			0.5~1			1~1.5		1.5~2		>2	
家庭财产损失率	0.45			0.54			0.35		0.2		0.1	
房屋损失率	0.5			0.71			0.3		1			
淹没时间/d	1~3	4~6	>7	1~3	4~6	>7	1~3	4~6	>7			
农林牧渔业损失率	0.45	0.5	0.8	0.6	0.8	0.85	0.4	0.45	0.5			

表 8 不同时段城市洪涝损失主要评估方法

Table 8 Main assessment methods of urban flood loss in different periods

方法	方程	参 数	主要适用时段
模型模拟	$h = f_1(q, x_1, x_2, \dots, x_n)$ $A = f_2(q, x_1, x_2, \dots, x_n)$	h 为淹没深度; A 为淹没面积; q 为预报降雨量; x_1, x_2, \dots, x_n 为若干当地特征参数(如下垫面条件、城市化率、气候条件等)	灾 前
空间信息格网模型	$W = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m \delta_i A_{ij} \eta_{jkm} + \sum_i \sum_j \delta_i B_{ij} \cdot D/365$	δ_i 为空间信息格网单元类型系数; A_{ij} 为第 i 洪水单元、第 j 行业固定资产数(万元); η_{jkm} 为第 j 行业、第 k 级水深、第 m 级淹没历时损失率; B_{ij} 为第 i 洪水单元、第 j 行业年产值(万元/年); D 为淹没时间天数 ^[48] 。 $\delta_i = \begin{cases} 1, & \text{单元类型为耕地、居民地、城市用地等} \\ 0, & \text{单元类型为其他(包括未利用土地和原水体等)} \end{cases}$	灾前、灾中、灾 后
基于 GIS 的洪涝损失评估	$W_a = \sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^k Q_{nml} \rho_{nml} + \sum_i \sum_j W_{ij} \cdot H_i$ ^[62]	W_a 为洪灾造成的总经济损失; Q_{nml} 与 ρ_{nml} 为第 l 级淹没范围内、第 m 级经济分区、第 n 级财产值(元)和相应的损失率; ρ 为财产类型(经济部门)数; i 为财产值级; j 为按经济发展水平分区的分区数; k 为洪水淹没程度(水深与历时)的分级数; W_{ij} 为第 j 经济区, i 财产的直接损失; H_i 为第 i 财产的损失率系数 ^[62]	灾前、灾中
基于神经网络的洪涝损失评估	无	淹没深度、淹没范围、淹没时间等洪涝信息, 以及受灾区域的特征要素	灾 中
关系曲线法	$y = f(x)$	y 为城市洪涝直接经济损失; x 为淹没水深、淹没历时、水流速度等城市洪涝因素之一; $f(x)$ 为 x 的单增函数	灾前、灾 后
调查统计	无	淹没深度、淹没范围、伤亡人数、承灾体类型等	灾 后

5 结论与展望

(1) 由于城市化进程的加快,使得产业间的联系加强,单个产业部门受到城市洪涝灾害所造成的损失不局限于本产业,还会造成前后向关联的影响,使得城市洪涝灾害损失更加复杂。现在城市存在的形式是与周围城市组成联系紧密的城市群,单个城市发生洪涝灾害,会通过交通、贸易等扩展到整个城市群,使得城市洪涝灾害损失范围更广。

(2) 在城市洪涝灾害损失评估中,直接经济损失计算主要以损失率类型方法为主,不同地区不同产业的损失率各不相同,在计算时要结合实际情况合理确定损失率。对于间接经济损失计算中的比例系数法,确定评价指标与损失系数尤为重要,同一场灾害,不同的评价指标和损失系数所得到的结果会有较大差异。随着科技的进步,将RS、GIS、神经网络等应用到城市洪涝损失评估中,使得评价精度更高,评价时间更短,为预测与应对城市洪涝灾害提供更有力的保障。

(3) 随着信息化水平的提高,可将机器学习、大数据挖掘等技术应用到城市洪涝损失评价中。深度学习可以提取图像中的信息,可以通过城市中的各种监控设备获得洪涝灾害期间受灾区域的视频影像,利用深度学习的方式快速获取受灾区域的淹没深度、受灾对象、破坏程度等信息,为救灾指挥提供依据;可以用过大数据挖掘的方式快速获取受灾情况,如通过将拥堵情况判断受灾区域,通过搜集网络上的各类信息获得洪涝灾害最新情况,为防洪救灾提供依据。

参考文献(References):

- [1] 韩松,王静,李娜. 我国城市洪涝灾害与应急避险指南[J]. 城市与减灾,2018(4): 21-25.
HAN Song, WANG Jing, LI Na. Features of urban flood disaster in China and guide to avoid danger during emergency situation [J]. City and Disaster Reduction, 2018 (4): 21-25.
- [2] 马进军. 城市涝灾综合防治与海绵城市建设[J]. 科技创业月刊,2015,28(19): 103-104+110.
MA Jinjun. Comprehensive prevention and control of urban waterlogging and sponge city construction [J]. Pioneering with Science & Technology Monthly, 2015, 28 (19): 103-104+110.
- [3] 鲜志斌. 城市洪涝危害及其防护措施[J]. 四川水泥,2014(12): 271.
XIAN Zhibin. Urban flood hazards and protective measures [J]. Sichuan Cement, 2014 (12): 271.

- [4] 王静,李娜,王杉. 洪水危险性评价指标与等级划分研究综述[J]. 中国防汛抗旱,2019,29(12): 21-26.
WANG Jing, LI Na, WANG Shan. Review on flood hazard assessment index and grade classification [J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29 (12): 21-26.
- [5] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展,2020,31(5): 713-724.
XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China [J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (5): 713-724.
- [6] 侯春生. 城市洪涝灾害的形成及防治措施[J]. 北方环境,2017,29(3): 101-102.
HOU Chunsheng. Study on urban flood disaster formation and prevention and control measures [J]. Environment and Development, 2017, 29 (3): 101-102.
- [7] 姜玲,邱志德. 城市洪涝灾害的间接经济损失评估——以北京市为例[J]. 现代城市研究,2014(7): 6-13.
JIANG Ling, QIU Zhide. The assessment of indirect economic loss of urban flood disaster: A case study of Beijing [J]. Modern Urban Research, 2014 (7): 6-13.
- [8] 李超超,程晓陶. 城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J]. 灾害学,2019,34(2): 57-62.
LI Chaochao, CHENG Xiaotao. New characteristics and formation mechanism of flood and waterlogging disasters in the context of rapid urbanization [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34 (2): 57-62.
- [9] VELASCO M, ÀNGELS CABELLO, RUSSO B. Flood damage assessment in urban areas. Application to the Raval district of Barcelona using synthetic depth damage curves [J]. Urban Water Journal, 2016, 13(4): 426-440.
- [10] INGLE SMITH D. Floods: physical processes and human impacts by K. Smith and R. Ward, John Wiley, Chichester 1998. No. of pages: 382 [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010, 24 (13): 1261-1261.
- [11] HAMMOND M J, CHEN A S, DJORDJEVIĆ S, et al. Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review [J]. Urban Water Journal, 2015, 12(1): 14-29.
- [12] JONGMAN B, KREIBICH H, APEL H, et al. Comparative flood damage model assessment: towards a European approach [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12(12): 3733-3752.
- [13] 王宝华,付强,谢永刚,等. 国内外洪水灾害经济损失评估方法综述[J]. 灾害学,2007(3): 99-103.
WANG Baohua, FU Qiang, XIE Yonggang, et al. A review on evaluation method of economic loss of flood in the world [J]. Journal of Catastrophology, 2007 (3): 99-103.
- [14] 韩平,程先富. 洪水灾害损失评估研究综述[J]. 环境科学与管理,2012(4): 65-68.
HAN Ping, CHENG Xianfu. Review on flood loss evaluation [J]. En-

- vironmental Science and Management, 2012 (4) : 65-68.
- [15] 王宝华. 洪灾损失分析及评估模型研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008.
WANG Baohua. Research on analysis and evaluation model of flood disaster loss [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2008.
- [16] 刘春腊, 马丽, 刘卫东, 等. 洪水灾害社会经济损失评估方法研究述评[J]. 灾害学, 2014, 29(2) : 136-141.
LIU Chunla, MA Li, LIU Weidong, et al. Evaluation methods on social and economic loss of flood disaster [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29 (2) : 136-141.
- [17] 冯民权, 周孝德, 张根广. 洪灾损失评估的研究进展[J]. 西北水资源与水工程 2002, 13(1) : 32-36.
FENG Minquan, ZHOU Xiaode, ZHANG Genguang. Review on development of assessment of flood damage loss [J]. Northwest Water Resources & Water Engineering, 2002, 13 (1) : 32-36.
- [18] ELLINGWOOD B, COROTIS R B, BOLAND J, et al. Assessing cost of dam failure[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1993, 119(1) : 64-82.
- [19] MERZ B, KREIBICH H, SCHWARZE R, et al. Review article “Assessment of economic flood damage” [J]. Natural Hazards & Earth System Science, 2010, 10(8) : 1697-1724.
- [20] 孟晓路. 基于洪灾损失率的辽绕防洪保护区洪灾损失评估[J]. 东北水利水电, 2017(11) : 58-59+63.
MENG Xiaolu. Flood loss assessment of liaorao flood protection zone based on flood loss rate [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2017 (11) : 58-59 + 63.
- [21] GERL T, KREIBICH H, FRANCO G, et al. A review of flood loss models as basis for harmonization and benchmarking [J]. Plos One, 2016, 11(7) : e0159791.
- [22] FRENI G, LA LOGGIA G, NOTARO V. Uncertainty in urban flood damage assessment due to urban drainage modelling and depth-damage curve estimation [J]. Water Science & Technology, 2010, 61(12) : 2979.
- [23] DAS S, LEE R. A non-traditional methodology for flood stage-damage calculations [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 24(6) : 1263-1272.
- [24] 涂婷杰. 水害损失函数与洪涝损失评估研究[J]. 黑龙江水利, 2017, 3(9) : 60-63.
TU Pingjie. Study on flood loss function and flood loss evaluation [J]. Heilongjiang Water Resources, 2017, 3 (9) : 60-63.
- [25] KOMOLAFE A A, HERATH S, AVTAR R. Establishment of detailed loss functions for the urban flood risk assessment in Chao Phraya River basin, Thailand [J]. Geomatics Natural Hazards and Risk, 2019, 10 (1) : 633-650.
- [26] 姚山虎. 涝区涝灾程度的模糊综合评价——以辽宁省典型涝区为例[J]. 黑龙江水利科技, 2019, 47(5) : 232-234.
YAO Shanhu. Fuzzy comprehensive evaluation of waterlogging degree in waterlogging area [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2019, 47 (5) : 232-234.
- [27] 金菊良, 魏一鸣, 杨晓华. 基于遗传算法的洪水灾情评估神经网络模型探讨[J]. 灾害学, 1998(2) : 6-11.
JIN Juliang, WEI Yiming, YANG Xiaohua. Investigation of genetic algorithm based on neural network model for evaluation of flood disaster [J]. Journal of Catastrophology, 1998 (2) : 6-11.
- [28] 唐明, 邵东国, 唐绪荣. 基于遗传程序设计的洪水灾害损失评估及自动建模[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(3) : 5-9.
TANG Ming, SHAO Dongguo, TANG xurong. Automatic modeling of flood damage loss assessment system based on genetic programming [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40 (3) : 5-9.
- [29] HUANG Z, ZHOU J, SONG L, et al. Flood disaster loss comprehensive evaluation model based on optimization support vector machine [J]. Expert systems with applications, 2010, 37(5) : 3810-3814.
- [30] LIU X S, HU X, WANG T L. Rapid assessment of flood loss based on neural network ensemble [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(8) : 2636-2641.
- [31] 邱新法, 汪朋, 金有杰, 等. 基于 GIS 潍坊市暴雨洪涝灾害损失评估方法研究[J]. 气象科学, 2015, 35(2) : 189-194.
QIU Xinfu, WANG Peng, JIN Youjie, et al. GIS-based loss assessment of flood disaster in Weifang [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2015, 35 (2) : 189-194.
- [32] 王恩. 基于 GIS 的洪灾损失地理评估方法及应用[J]. 吉林水利, 2016(9) : 49-52.
WANG En. Method and application of flood loss geographic assessment based on GIS [J]. Jilin Water Resources, 2016 (9) : 49-52.
- [33] 王艳艳, 李娜, 王杉, 等. 洪灾损失评估系统的研究开发及应用[J]. 水利学报, 2019, 50(9) : 1103-1110.
WANG Yanyan, LI Na, WANG Shan, et al. Development and application of flood damage assessment system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50 (9) : 1103-1110.
- [34] 王宇飞, 孙燕, 张宏. 洪灾损失快速评估中的社会经济统计数据空间展布模拟[J]. 水利经济, 2016(5) : 69-74.
WANG Yufei, SUN Yan, ZHANG Hong. Census mapping of socio-economic data by modeling loss assessment of flood disasters [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2016 (5) : 69-74.
- [35] 李纪人, 丁志雄, 黄诗峰, 等. 基于空间展布式社经数据库的洪涝灾害损失评估模型研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(2) : 104-110.
LI Jiren, DING Zhixiong, HUANG Shifeng, et al. Research of flood and waterlogging loss assessment model based on spatial distribution social-economic database [J]. Journal of China Institute of Water, 2003, 1 (2) : 104-110.
- [36] 张文婷, 刘永志. 基于 GIS 空间计算格网的洪灾损失评估[C]. 北京: 智能信息技术应用学会, 2011.
ZHANG Wenting, LIU Yongzhi. Flood loss assessment based on GIS

- spatial computing grid [C]. Beijing: Intelligent Information Technology Application Association, 2011.
- [37] 刘小生,赵小思. 基于空间信息格网的洪灾损失评估[J]. 工程勘察, 2013, 41(6): 66-69.
- LIU Xiaosheng, ZHAO Xiaosi. Flood loss evaluation based on spatial information grid [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(6): 66-69.
- [38] BEHZAD J, ROLAND L, BACH P M, et al. A rapid urban flood inundation and damage assessment model [J]. Journal of Hydrology, 2018: S002216941830578X.
- [39] 武靖源,徐杨. 洪灾经济损失评估模型研究——(1) 直接经济损失评估[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(11): 53-56.
- WU Jingyuan, XU Yang. A study on the evaluation theory and mathematical model for economic loss of flood damage —— (I) direct economic loss [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 1998, 18(11): 53-56.
- [40] JONKMAN S N, BRINKHUIS-JAK M, KOK M. Cost benefit analysis and flood damage mitigation in the Netherlands [J]. HERON, 2004, 49(1): 95-111.
- [41] 左晋中. 洪涝灾情评估方法的探讨[J]. 山西水利, 2003, 3(1): 7-8.
- ZUO Jinzhong. Discussion on flood disaster assessment method [J]. Shanxi Water Resources, 2003, 3(1): 7-8.
- [42] 傅湘,纪昌明. 洪灾损失评估指标的研究[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 432-435.
- FU Xiang, JI Changming. Study on estimating index of flood damage [J]. Advances In Water Science, 2000, 11(4): 432-435.
- [43] 冯平,崔广涛,钟响. 城市洪涝灾害直接经济损失的评估与预测[J]. 水利学报, 2001(8): 64-68.
- FENG Ping, CUI Guangtao, ZHONG Yun. On the evaluation and prediction of urban flood economic loss [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(8): 64-68.
- [44] 李春华,李宁,李建,等. 洪水灾害间接经济损失评估研究进展[J]. 自然灾害学报, 2012(2): 21-29.
- LI Chunhua, LI Ning, LI Jian, et al. Review of research progress in indirect economic loss estimation of flood damage [J]. Journal of Natural Disasters, 2012(2): 21-29.
- [45] STÉPHANE HALLEGATTE, HOURCADE J C, DUMAS P. Why economic dynamics matter in assessing climate change damages: Illustration on extreme events [J]. Ecological Economics, 2007, 62(2): 330-340.
- [46] 张鹏,李宁,刘雪琴,等. 基于投入产出模型的洪涝灾害间接经济损失定量分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(4): 425-431.
- ZHANG Peng, LI Ning, LIU Xueqin, et al. Quantitative analysis of indirect economic loss to flood disaster based on an input-output model [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2012, 48(4): 425-431.
- [47] 姜玲,张伟,刘宇,等. 基于多区域 CGE 模型的洪灾间接经济损失评估——以长三角流域为例[J]. 管理评论, 2016, 28(6): 25-31.
- JIANG Ling, ZHANG Wei, LIU Yu, et al. Assessment of indirect economic loss of flood disaster based on multi-regional CGE model: a case of yangtze river delta basin [J]. Management Review, 2016, 28(6): 25-31.
- [48] 李红英. 基于 GIS 的洪灾损失评估研究——以黑河为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- LI Hongying. Flood damage loss assessment based on GIS——for Heihe as an example [D]. Xi'an: Xi'an University of technology, 2007.
- [49] 陈静. 鄱阳湖区洪水灾害损失快速评估[D]. 南昌: 南昌大学, 2006.
- CHEN Jing. Study on the quick assessment model for economic loss of flood disaster in PoyangLake Area [D]. Nanchang: Nanchang University, 2006.
- [50] 贾磊. 洪水信息管理决策支持系统的开发与研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- JIA Lei. Development and research of flood information management decision support system [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [51] 丁志雄,胡亚林,李纪人. 基于空间信息格网的洪灾损失评估模型及其应用[J]. 水利水电技术, 2005, 36(6): 93-101.
- DING Zhixiong, HU Yalin, LI Jiren. Model for loss assessment of flood disaster based on spatial information grid [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(6): 93-101.
- [52] PAHLAVANI H, DEGHANI A A, BAHREMAND A R, et al. Intelligent estimation of flood hydrographs using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) [J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2017, 3(1): 35.
- [53] 任鲁川. 灾害损失定量评估的模糊综合评判方法[J]. 灾害学, 1996(4): 5-10.
- REN Luchuan. The method of fuzzy comprehensive evaluation applied in quantitative assessment of disaster losses [J]. Journal of Catastrophology, 1996(4): 5-10.
- [54] 陈亚宁. 灾害损失评估的灰色聚类分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1999(6): 551-555.
- CHEN Yaning. Grey clustering analysis of the disaster losses assessment [J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 1999(6): 551-555.
- [55] 吴红华. 灾害损失评估的灰色模糊综合方法[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(2): 115-118.
- WU Honghua. Interval numbers fuzzy comprehensive evaluation method of disaster loss assessment [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(2): 115-118.
- [56] OLADOKUN V O, PROVERBS D G, LAMOND J. Measuring flood

- resilience: a fuzzy logic approach [J]. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 2017, 35(5): 470-487.
- [57] 魏一鸣, 万庆, 周成虎. 基于神经网络的自然灾害灾情评估模型研究[J]. *自然灾害学报*, 1997, 6(2): 1-6.
- WEI Yiming, WAN Qing, ZHOU Chenghu. Study on natural disaster assessment model based on neural network [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1997, 6(2): 1-6.
- [58] 胡啸. 神经网络集成在洪灾损失评估中的应用研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2012.
- WU Xiao. Research on Application of neural network ensemble in flood loss assessment [D]. Ganzhou: Jiangxi University of technology, 2012.
- [59] AFIFI Z, CHU H J, KUO Y L, et al. Residential flood loss assessment and risk mapping from high-resolution simulation [J]. *Water*, 2019, 11(4): 751.
- [60] 张小稳, 刘国庆, 范子武. 动态洪水风险图在无锡市城区防洪中的应用研究[J]. *水资源开发与管理*. 2019(5): 10-17.
- ZHANG Xiaowen, LIU Guoqing, FAN Ziwu. Application research of dynamic flood risk map in flood control of Wuxi City [J]. *Water Resources Development and Management*. 2019(5): 10-17.
- [61] 施国庆. 洪灾损失率及其确定方法探讨[J]. *水利经济*, 1990(2): 37-42.
- SHI Guoqing. The loss rate of flood disaster and its determination method [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 1990(2): 37-42.
- [62] 朱留军. 基于 GIS 在洪灾损失评估中的应用[J]. *城市勘测*, 2009(6): 36-38.
- ZHU LiuJun. Based on GIS in flood disaster loss assessment application [J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009(6): 36-38.

(责任编辑 康健)