

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.001

城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述

黄国如^{1,2,3}, 罗海婉¹, 卢鑫祥⁴, 杨聪辉⁴, 王 峥⁵, 黄 婷⁵, 马经广⁵

(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; 4. 广州市水务规划勘测设计研究院, 广东 广州 510641; 5. 广东省水文局佛山水文分局, 广东 佛山 528000)

摘要:对城市洪涝灾害风险的概念和内涵进行系统梳理, 论述历史灾情统计法、遥感和 GIS 耦合法、指标体系法和情景模拟法等 4 种洪涝灾害风险分析方法的应用现状、适用范围和优缺点, 着重就应用较为广泛的风险评估指标体系法进行论述, 介绍指标体系构建和指标权重确定方法; 论述了可应用于城市洪涝灾害风险等级区划的相等间隔法、分位数法、均值标准差法、自然间断法和隶属度函数法等方法, 旨在为洪涝风险等级区划提供参考。

关键词:城市洪涝灾害; 风险分析; 指标体系法; 风险区划

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)06-0001-06

Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster // HUANG Guoru^{1,2,3}, LUO Haiwan¹, LU Xinxiang⁴, YANG Conghui⁴, WANG Zheng⁵, HUANG Ting⁵, MA Jingguang⁵ (1. South China University of Technology, School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou 510640, China; 2. South China University of Technology, State Key Laboratory of Subtropical Building Science, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and Greenization for Water Conservancy Project, Guangzhou 510640, China; 4. Guangzhou Institute of Water Planning and Survey Design, Guangzhou 510641, China; 5. Foshan Branch of Guangdong Provincial Bureau of Hydrology, Foshan 528000, China)

Abstract: The concept and connotation of urban flood disaster risk are analyzed systematically, and it is discussed that the application situation, scope of application as well as the advantages and disadvantages of four flood disaster risk analysis methods including historical disaster statistics, remote sensing and GIS coupling, index system method and scenario simulation method. The index system method which is widely used for risk assessment is mainly discussed and the method of index system construction and index weight determination are introduced. The equal interval method, quantile method, mean standard deviation method, natural interruption method and membership function method that can be applied in the urban flood disaster risk level zoning are expounded, providing reference for the flood risk level zoning.

Key words: urban flood disaster; risk analysis; index system method; risk zoning

随着全球气候变化加剧和城市化水平的快速发展,城市洪涝灾害已成为影响城市地区经济社会发展的主要自然灾害之一,防灾减灾问题在国家、城市发展及学术研究等各层面上均引起了广泛关注和高度重视^[1-8]。风险评估是风险管理和防灾减灾决策的基础和技术支持,辨析城市洪涝灾害特性、探究相关理论方法并进行示范和应用,可为风险应对和管理提供参考和依据,对国民生命财产安全的保障、社会的稳定及快速发展、人民群众洪涝风险意识的提

高、城市洪涝风险评估基础理论和技术方法体系的丰富和规范具有重要的现实意义^[9]。由于不同区域的城市洪涝灾害特性存在差异,加上对风险内涵的认识和理解不同,对城市洪涝灾害及其风险的内涵进行研究和梳理,借助风险评估相关的规范标准对风险评估流程进行划分,可加深对风险评估相关概念的理解和认识。以风险分析中常用的指标体系法为例,基于城市洪涝灾害特性对评估指标进行分析和研究,构建城市洪涝灾害评估指标体系,介绍指

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC1502704);国家自然科学基金(51879108);广州市科技计划(201803030021)

作者简介:黄国如(1969—),男,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: huanggr@scut.edu.cn

洪涝过程的事件和情况,要认识到人的因素和组织因素的重要性,以便于风险应对。

风险分析是在风险识别的基础上,确定城市洪涝灾害风险的分布及其相对大小,可为其风险评价和防灾减灾决策提供信息支持。风险分析方法可以是定性、定量或半定量的。定量分析可估计出洪涝灾害发生的概率及其后果的实际数值,如经济损失值、受灾人口数量、暴雨发生概率等,并形成对应的关系曲线或图表,如概率-经济损失曲线、概率-死亡人口曲线等。在实际应用中,受资料限制,全面的定量分析可行性较低,多采用定性或半定量方法进行分析。许多学者对洪涝灾害分析已有较多研究并形成了多种方法,如基于历史灾情数据、基于遥感技术和GIS耦合、基于指标体系及基于情景模拟等的方法。

2.1 基于历史灾情数据的方法

基于历史灾情数据的灾害风险评估方法一般以研究区域记载的历史灾害强度数据和损失数据为基础,利用数学模型对样本数据进行统计分析,获得灾害强度与损失的统计规律,进而实现对自然灾害的风险评估。其评估一般有如下步骤:①选取科学的洪涝灾害风险模型或公式;②从研究区域相关历史资料中提取相关历史灾情数据;③对研究区域洪涝灾害风险进行分析评估。

基于历史灾情数据的分析方法是建立在灾害数据库基础上的定量评估方法,在资料数据可获得的前提下,该方法不需要详细的地理背景数据,只需要通过一定的灾害资料进行统计分析,采用数学方法建立起灾害风险模型,是一种思路清晰、计算简单的研究方法。另外,还可以根据已有历史资料进行推敲,分析其合理性和科学性,但此方法非常依赖样本数据,在实际应用中常受到以下几点限制:①该方法对历史洪涝灾情数据的完整性要求较高。长时间序列的历史灾情数据一般是保密数据,不易获取,常常会出现样本数据太少或者不完备,甚至数据缺失的情况,影响历史灾情分析的准确性。②在历史灾情数据的记录方面,历史灾害强度数据一般在较大空间尺度上记录,如河流流域,而历史灾害损失数据通常以行政区为单位进行记载,如县、郡、市等,两方面数据难以进行空间上的匹配。③该方法对历史洪涝灾情数据的准确性要求较高,可获取的历史灾情数据受限于历史资料记载的详略情况,这在进行历史灾害统计分析时可能出现偏差,统计分析无法做到细致准确,从而影响对历史灾情的精确分析与评估。

2.2 基于遥感技术与GIS耦合的方法

该方法是指利用卫星遥感监测技术获取淹没范围、淹没历时、承灾体数量等灾情信息,耦合GIS的

空间分析技术及其强大的数据管理功能,结合研究区域的地面高程数据获取淹没水深、构建社会经济数据库等进行洪涝灾害风险分析的方法。采用遥感监测技术获取洪涝灾害信息的关键在于监测区域内的水体识别技术,目前可用于识别水体的方法主要为阈值法、谱间分析法和多波段运算法。获取水体分布信息后,利用GIS技术分析灾害的空间分布规律并进行风险分析。该方法可反映区域的洪涝灾害及其风险的空间分布特征,还可对实时监测数据进行分析。该方法的局限在于对地面高程数据的精度要求高,GIS的淹没水深分析技术尚未成熟等。

2.3 基于指标体系的方法

基于指标体系的城市洪涝灾害风险评估方法是基于自然灾害风险理论,从危险性和易损性等灾害风险构成要素出发,构建研究区域灾害风险评估指标体系,通过一系列数学方法处理原始指标,对研究区域进行风险评估的方法,常用的方法有加权综合评价法、模糊数学法、人工神经网络法、灰色系统模型、概率模型和动力学模型等,其评估方法一般步骤如下:①确定洪涝灾害风险数学评估方法和指标权重计算方法;②从研究区域相关资料中选择洪涝灾害风险相关要素资料,构建研究区域洪涝灾害风险评估指标体系,确定指标权重;③根据选定的评估方法和构建的指标体系对研究区域洪涝灾害风险进行分析评估。

基于指标体系的风险评估方法具有建模与计算简便、数据易于获取的优点,可宏观反映区域风险分布特性,在我国洪涝灾害风险分析中应用广泛。但该方法也存在一定的局限:①评估指标的选取受限于数据的可获取性,若评估指标数据库的可用指标数量较少时,较难保证选取指标的代表性及指标体系的系统性;②对指标数据精度的要求较高,若评估指标数据精度较低时,容易出现以点代面的情况,进而影响评估成果的精度。

2.4 基于情景模拟的方法

基于情景模拟的城市洪涝灾害风险评估是指通过设置洪涝灾害发生的频率和强度、气候变化模式、土地利用变化、人口和经济变化等情景进行多种涉及自然和社会变化的情景并进行模拟,分析城市洪涝灾害风险的未态势。该方法的步骤一般为:①构建模型,根据区域特征建立相应的水文水动力模型,并对构建模型的可靠性和精度进行验证;②情景设计,根据研究需要设定特定城市洪涝灾害发生的频率和强度、气候变化模式及人口与经济等模拟情景;③情景模拟与分析,对各种情景下的城市洪涝灾害进行模拟并获取洪涝灾害过程,对其风险进行

分析与评价。

基于情景分析的评估方法对历史灾害数据要求较低,且可对灾害风险进行可视化表达,使区域内承灾体的易损性精确到个体或系统,能够直观、高精度地显示灾害事件的影响范围和程度,展示灾害风险的空间分布特征;同时,该方法可以实现灾害风险的动态评估,为防灾减灾及风险管理决策提供数据支撑和科学依据,是自然灾害风险评估发展的必然趋势。但是,该方法对区域的地理背景资料和排水系统资料要求较高,对构建区域水文水动力模型的精度有一定要求,工作量大,适宜在中、小尺度进行灾害评估,在大尺度区域较难开展。尽管基于情景模拟方法的研究和应用取得了很大进展,但研究范围多限于对致灾因子强度表征,综合区域承灾体易损性方面的洪涝灾害研究仍较缺乏。

上述4种城市洪涝风险评估方法的分类是相对的,各方法之间互有联系、相互协调。如,情景模拟得出的淹没情况和历史灾情数据可作为评估指标数据进行城市洪涝风险评估。因此,在风险评估的实际应用中,需要根据研究对象的灾情数据库、地理背景资料等具体特征,充分考虑研究区域的空间尺度大小以及风险评估结果精度要求,选择科学合理的评估方法。

3 城市洪涝灾害风险评估指标体系构建和权重确定

由风险评估流程和方法可知,指标体系是常用的风险分析方法之一,应用广泛且适用性强,能够用于多种尺度区域的风险分析^[23]。选取合理可行的评估指标是开展风险评估的前提,国内外均开展了洪涝灾害风险研究,但由于各地区洪涝灾害特性存在差异、资料获取能力不同等,在评估指标的选取上尚未形成统一的体系。尽管不同地区的风险评估指标存在一定差异,但指标选取仍需遵循可行性、科学性、代表性、独立性和系统性等原则。此外,若从灾害系统角度定义城市洪涝灾害风险,评估指标的选择与评估框架相关,可根据指标选取原则和评估框架进行评估体系构建。本文以危险性-易损性(H-V)评估框架为例,从危险性、易损性两方面出发,综合考虑城市系统及其洪涝灾害的特性建立指标体系,如图2所示。该体系仅提供参考价值,实际应用中的指标选择仍需根据风险评估的尺度、单元、资料可获取性等实际情况确定。

当风险评估过程中涉及指标体系法并需要计算指标权重时,可选择特定的数学方法确定权重。指标权重的大小反映了指标在风险评估中的重要性程

度,权重越大,说明该指标对风险的贡献值越大,反之则说明该指标对风险的贡献值较小。目前可用于指标权重计算的方法较多,主要分为3类:①主观权重法,如直接评分法、对比排序法、Delphi法和层次分析法等;②客观权重法,如熵权法、标准差法和CRITIC法等;③主客观组合权重法,即利用两种或两种以上的方法对权重进行组合计算的方法。

主观权重法主要依靠行业专家自身的专业知识对指标的重要性做出排序而确定指标权重值,受主观因素影响较大,有时不能客观地反映实际情况;客观权重法主要根据指标数据的统计分布规律进行分析而求得各指标权重,该方法一定程度上克服了主观因素影响,体现了数据的客观性。但是指标权重既是决策者的主观评价,同时又是指标本身物理属性的客观反映,是主客观综合度量的结果,为了全面反映指标的实际重要性,可采用综合权重方法,将主观权重和客观权重进行加权平均得到评价指标的综合权重^[24],以促使指标的权重更加合理。

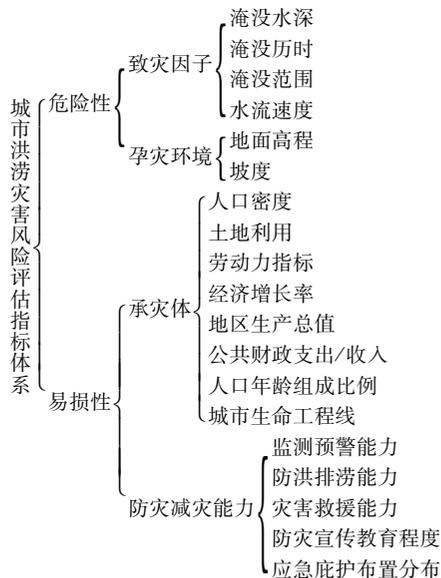


图2 城市洪涝灾害风险评估指标体系

Fig. 2 Risk assessment index system of urban flood disaster

4 城市洪涝灾害风险区划方法

洪涝灾害风险评价中,风险区划方法最常用于处理风险分析结果,因此风险评价亦可称为风险区划。城市洪涝风险区划包括将风险分析结果与预先设定的风险准则或阈值相比较,或是风险分析结果之间进行比较,从而确定风险等级。风险区划是在风险分析上的宏观分区,风险区划图可反映风险的空间分布,对风险分析结果进行科学合理的区划,可真实、客观地反映洪涝风险空间分布的特征和规律,从而绘制出科学性、实用性和指导性较好的风险区划图,是重要的风险评估成果,对风险应对及管理、防洪

排涝和防灾减灾等均有重要的参考价值和指导意义。

风险区划是洪涝灾害风险评估必不可少的步骤,一般是指将风险分析结果划分为若干个不同风险高低等级的区域,最简单的等级区划方式是把风险分为需要应对区域或不需要应对区域两种。此外,还可根据风险的可承受程度划分为不可承受、中间、广泛可承受区域共3种。不可承受区域即特级重点防范区域,无论发生洪涝灾害的可能性大小、风险值高低,此区域发生洪涝灾害的后果是无法承受的,因此要不惜代价地防范该区域的灾害发生,采取全面的风险应对措施。中间区域的重要性处于不可承受区域和广泛可承受区域之间,该区域的风险应对措施需要综合考虑措施的收益比。广泛可承受区域的社会经济重要性很低或发生洪涝灾害的概率很低,风险值一般较小,不需要采取任何风险应对措施。

由于风险评估整个过程均具有一定的不确定性,因此以上两种形式的风险区划方式均存在较大的局限性,难以确定各类区域的界定值。以往的研究中,常将结果根据特定的等级区划方法将风险分析结果区划成若干个等级,并绘制成直观可靠的风险区划图,为防洪排涝部门的决策提供科学依据。对于风险区划图而言,区划等级的数量应综合考虑数据精度、比例尺大小、数据分布特征和人眼辨认能力进行确定。对于一般的区划图而言,以3~7级为宜。洪涝风险区划常用等级的相关描述,数字越大代表风险越高:1级,风险极低;2级,风险低;3级,风险较低;4级,风险中等;5级,风险较高;6级,风险高;7级,风险极高。这个可供不同等级数量的区划参考。风险区划方法有:

a. 相等间隔法。相等间隔法是指将风险分析结果的值划分为大小相等的若干间隔,此方法可突出极值的变化,适合数据分布较均匀的分级。将风险分析结果按从小到大顺序排列,包含 x_1, x_2, \dots, x_n 共 n 个区划单元,区划等级数为 m ,第 i 与 $i+1$ 个等级($i=1, 2, \dots, m-1$)之间的界限值 A_i 计算公式为

$$A_i = x_1 + \frac{i}{m}(x_n - x_1) \quad (1)$$

b. 分位数法。分位数法是指按风险区划的单元数量进行划分,使各区间数据的数量相同,此方法可突出中间值的变化,适合数据分布较均匀的分级。假设风险分析的结果按从小到大的顺序进行排列,包含 x_1, x_2, \dots, x_n 共 n 个区划单元,区划等级数为 m 。当 n 为 m 的 K 倍(K 为正整数)时,该方法才具备适用性。第 i 与 $i+1$ 个等级($i=1, 2, \dots, m-1$)之间的界限值 A_i 为

$$A_i = x_{1+i/m} \quad (2)$$

c. 均值-标准差法。均值-标准差法是指利用数据的平均值 \bar{x} 和标准差 S 为基础划分等级,可减少异常数据的影响,适合呈正态分布数据的分级。该方法以 \bar{x} 为中心,左右逐次减去若干个相等倍数 a 的 S 作为界限值,该方法仅适用于区划等级数 m 为偶数的分级,各级区间为: $[x_1, \bar{x} - (m/2 - 1)aS), \dots, [\bar{x} - aS, \bar{x}), [\bar{x}, \bar{x} + aS), \dots, [\bar{x} + (m/2 - 1)aS, x_n)$ 。

d. 自然间断点法。自然间断点法是美国环境系统研究所(ESRI)研制并应用在ArcGIS中的一种分级方法,属聚类分析的单变量分类方法。该方法根据数值统计分布规律进行分级和分类,目的是在不改变有序样本的前提下,使其分割的相同等级内的数据相似值最优,而不同级别之间的数据差距达到最大,不同级别之间的界限点出现在数据突变明显处。自然间断点法适用性强,能够用于多类型数据的分级处理,在干旱、洪涝灾害风险等级区划中应用广泛。

e. 隶属度函数法。隶属度函数法是模糊数学中区划数据等级中的关键处理方法。若将区划等级看作集合,需要分级的数据看作是元素,上述的相等间隔法、分位数法等方法的集合和元素之间的关系则是绝对的,元素只有属于或不属于该集合的关系。但模糊数学认为元素和集合之间的关系并非绝对的,可利用隶属度来表示元素属于集合的程度,其中隶属度值范围为 $[0, 1]$,隶属度越高说明元素和集合的贴近程度越高。因此运用隶属度函数法进行 m 个等级的区划时,需要确定 m 个模糊集合和元素与集合之间的隶属度函数,计算元素与模糊集合之间的隶属度 $u_i (i=1, 2, \dots, m)$,通常采用最大隶属度原则对元素进行区划等级处理,即元素与模糊集合之间隶属度最大时,即代表该元素属于该集合。

5 结 论

a. 洪涝灾害系统主要有3种评估框架,即危险性-暴露性-脆弱性(H-E-V)、危险性-暴露性-脆弱性-防灾减灾能力(H-E-V-R)、危险性-易损性(H-V)。城市洪涝风险作为风险的一种,其评估流程遵循风险评估的规律,即风险识别、风险分析和风险评价。

b. 以危险性-易损性评估框架为例,综合考虑城市洪涝灾害特性构建了反映洪涝风险特征的指标体系,论述了主观、客观赋权法中多种指标权重计算方法,其中主观赋权法主要依靠行业专家自身的专业知识对指标的重要性做出排序而确定指标权重值,客观赋权法则是根据指标数据的统计分布规律进行分析而求得各指标权重。

c. 洪涝风险等级可反映风险高低,可对风险进

行定量或定性的描述和比较。风险区划等级数量一般以 3~7 级为宜,论述了可应用于风险等级区划的相等间隔法、分位数法、均值标准差法、自然间断法和隶属度函数法等方法,可为等级区划提供参考。

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. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4):485-491. (in Chinese))

[2] 柳杨,范子武,谢忱,等. 城镇化背景下我国城市洪涝灾害演变特征[J]. 水利水运工程学报, 2018(2):13-21. (LIU Yang, FAN Ziwu, XIE Chen, et al. Study on evolvement law of urban flood disasters in China under urbanization [J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(2):13-21. (in Chinese))

[3] 张建云,宋晓猛,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战:I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment; I. hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))

[4] ZIEGLER A D. Water management; reduce urban flood vulnerability[J]. Nature, 2012, 481:145.

[5] SOWMYA K, JOHN C M, SHRIVASTHA N K. Urban flood vulnerability zoning of Cochin City, southwest coast of India, using remote sensing and GIS [J]. Natural Hazards, 2015, 75(2):1271-1286.

[6] CHEN W L, WANG X L, DENG S H, et al. Integrated urban flood vulnerability assessment using local spatial dependence based probabilistic approach [J]. Journal of Hydrology, 2019, 575:454-469.

[7] 许怡,吴永祥,王高旭,等. 伦敦城市洪水风险管理的启示[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(4): 13-18. (XU Yi, WU Yongxiang, WANG Gaoxu, et al. Enlightenment of urban flood risk management in London[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(4):13-18. (in Chinese))

[8] 何生兵,朱运亮. 极端气候变化背景下灾害移民的社会适应策略探析[J]. 水利经济, 2019, 37(5):73-76. (HE Shengbing, ZHU Yunliang. Social adaptation strategy of disaster-forced migration under extreme climate change [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(5):73-76. (in Chinese))

[9] 王远坤,王栋,黄国如,等. 城市洪涝灾情评估与风险管理初探[J]. 水利水运工程学报, 2019(6): 139-142. (WANG Yuankun, WANG Dong, HUANG Guoru, et al.

Urban flood disaster assessment and risk management[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 139-142. (in Chinese))

[10] 殷杰,尹占娥,许世远,等. 灾害风险理论与风险管理方法研究[J]. 灾害学, 2009, 24(2):7-11. (YIN Jie, YIN Zhan'e, XU Shiyuan, et al. Disaster risk theory and risk management method[J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(2):7-11. (in Chinese))

[11] 黄绵松,杨少雄,齐文超,等. 固原海绵城市内涝削减效果数值模拟[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 13-18. (HUANG Miansong, YANG Shaoxiong, QI Wenchao, et al. Numerical simulation of urban waterlogging reduction effect in Guyuan sponge city [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5):13-18. (in Chinese))

[12] CAMARASABA M, SORIANO G J. Flood risk assessment and mapping in peri-urban mediterranean environments using hydrogeomorphology. Application to ephemeral streams in the Valencia region (eastern Spain) [J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 104(2):189-200.

[13] 陆海明,邹鹰,孙金华,等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护, 2020, 36(1):58-65. (LU Haiming, ZOU Yin, SUN Jinhua, et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1):58-65. (in Chinese))

[14] 张会,张继权,韩俊山. 基于 GIS 技术的洪涝灾害风险评估与区划研究:以辽河中下游地区为例[J]. 自然灾害学报, 2005(6): 141-146. (ZHANG Hui, ZHANG Jiquan, HAN Junshan. GIS-based assessment and zoning of flood/waterlogging disaster risk; a case study on middle and lower reaches of Liaohe River [J]. Journal of Natural Disasters, 2005(6):141-146. (in Chinese))

[15] 王颖. 基于 GIS 的青岛环湾地区暴雨灾害风险评估[J]. 中国科技信息, 2011(11):29-30. (WANG Ying. Risk assessment of rainstorm disaster around the Jiaozhou bay in Qingdao based on GIS [J]. China Science and Technology Information, 2011(11):29-30. (in Chinese))

[16] 尹占娥,许世远,殷杰,等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 地理学报, 2010, 65(5):553-562. (YIN Zhan'e, XU Shiyuan, YIN Jie, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging [J]. ACTA Geographica Sinica, 2010, 65(5):553-562. (in Chinese))

[17] 殷杰,尹占娥,王军,等. 基于 GIS 的城市社区暴雨内涝灾害风险评估[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(6):92-95. (YIN Jie, YIN Zhan'e, WANG Jun, et al. GIS-based disaster risk assessment of the urban community rainstorm waterlogging [J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(6):92-95. (in Chinese))

(下转第 17 页)

- 2016,32(6):142-150. (in Chinese))
- [12] 田桂桂. 基于物质循环的生态用水价值能值评估方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [13] 吕翠美. 区域水资源生态经济价值的能值研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [14] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳, 等. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [15] ODUM H T. Environmental accounting emergy and environmental decision making [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [16] HUANG Shuli, CHANG Lifang, YEH C T. How vulnerability is the land scape when the typhoon comes? an emergy approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 100(4):415-417.
- [17] 吕翠美, 吴泽宁. 区域水资源生态经济系统可持续发展评价的能值分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 144-149. (LYU Cuimei, WU Zening. Emergy analysis for sustainable development assessment regional water ecological-economics system [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(7): 144-149. (in Chinese))
- [18] 陈伟, 耿涌, 黄斌斌, 等. 西部欠发达地区生态经济系统的能值分析: 以青海省海西蒙古族藏族自治州为例[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7904-7913. (CHEN Wei, GENG Yong, HUANG Binbin, et al. Emergy accounting of a western underdeveloped eco-economic system: a case study of Haixi in Qinghai [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 7904-7913. (in Chinese))
- [19] 吴婧慈. 基于能值分析的海岛生态系统服务价值研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2018.
- [20] 贾小乐, 周源, 延建林, 等. 基于能值分析的环太湖城市群生态经济系统可持续发展研究[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6487-6499. (JIA Xiaole, ZHOU Yuan, YAN Jianlin, et al. Sustainable development of an ecological-economic system in the Taihu Lake city cluster based on emergy analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6487-6499. (in Chinese))
- [21] 靖娟, 宋华力, 蒋桂芹. 基于能值的鄂尔多斯市水资源生态经济系统可持续发展动态分析[J]. 节水灌溉, 2015(1): 48-51. (JING Juan, SONG Huai, JIANG Guiqin. Dynamic assessment of sustainable development of Ordos water ecological economic system based on emergy analysis[J]. Water Saving Irrigation, 2015(1): 48-51. (in Chinese))
- [22] 王慧亮, 吴泽宁, 郭溪, 等. 基于生态环境损失的农业生态系统能值分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(6): 92-97. (WANG Huiliang, WU Zening, GUO Xi, et al. Emergy analysis of agricultural ecosystem based on ecological environment loss [J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2016, 37(6): 92-97. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-03-02 编辑: 熊水斌)

(上接第 6 页)

- [18] 杜康宁, 梁忠民, 王军, 等. 城市洪涝灾害风险区划研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(1): 61-64. (DU Kangning, LIANG Zhongmin, WANG Jun, et al. Study on risk zoning of urban flood disaster [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(1): 61-64. (in Chinese))
- [19] 李远平, 杨太保, 包训成. 大别山北坡典型区域暴雨洪涝风险评价研究: 以安徽省六安市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 582-587. (LI Yuanping, YANG Taibao, BAO Xuncheng. Assessment of rainstorm flood risk in Lu'an city on the north slope of dabeie mountain [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(4): 582-587. (in Chinese))
- [20] 周成虎, 万庆, 黄诗峰, 等. 基于 GIS 的洪水灾害风险区划研究[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 15-24. (ZHOU Chenghu, WAN Qing, HUANG Shifeng, et al. A GIS-based approach to flood risk zonation [J]. ACTA Geographica Sinica, 2000, 55(1): 15-24. (in Chinese))
- [21] 李碧琦, 罗海婉, 陈文杰, 等. 基于数值模拟的深圳民治片区暴雨内涝风险评估[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 20-28. (LI Biqi, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Risk assessment of rainstorm waterlogging based on numerical simulation in Shenzhen Minzhi district [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 20-28. (in Chinese))
- [22] 张倩玉, 许有鹏, 雷超桂, 等. 东南沿海水库下游地区基于动态模拟的洪涝风险评估[J]. 湖泊科学, 2016, 28(4): 868-874. (ZHANG Qianyu, XU Youpeng, LEI Chaogui, et al. Riskassessment of flood based on dynamic simulation in downstream of reservoirs in coastal area of southeast China [J]. Journal of Lake Science, 2016, 28(4): 868-874. (in Chinese))
- [23] 陈军飞, 陈梦晨, 高士佩, 等. 基于云物元模型的南京市雨洪灾害风险评估[J]. 水利经济, 2019, 37(2): 67-72. (CHEN Junfei, CHEN Mengchen, GAO Shipai, et al. Risk assessment of rainstorm disasters in Nanjing based on cloud matter-element model [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(2): 67-72. (in Chinese))
- [24] 胡启玲, 董增川, 杨雁飞, 等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 425-432. (HU Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 425-432. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-06-17 编辑: 彭桃英)