

基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法

高玉琴¹,汪 键¹,高 见²,季孔阳¹,刘云苹¹,高 力¹

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 江苏省农村水利科技发展中心,江苏 南京 210029)

摘要:基于城市系统应对洪涝灾害事件的响应过程,从基础抵御、防灾预警、应急响应和适应恢复4个方面构建了包含4个一级指标和20个二级指标的城市洪涝灾害韧性评价指标体系,在此基础上通过可拓层次分析法和熵权法对指标分别进行主观和客观赋权,结合博弈论理论进行组合赋权,提出了基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法。南京市6个行政区的验证结果表明:该方法可有效评价城市洪涝灾害韧性水平,6个行政区中建邺区、江宁区为高韧性地区,鼓楼区、秦淮区为较高韧性地区,雨花台区为中等韧性地区,溧水区为较低韧性地区。

关键词:城市韧性;洪涝灾害;韧性评价;云模型;组合赋权

中图分类号:X915.5

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)02-0022-08

Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model//GAO Yuqin¹, WANG Jian¹, GAO Jian², JI Kongyang¹, LIU Yunping¹, GAO Li¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Rural Water Conservancy Science and Technology Development Center, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the response process of urban system to flood disaster events, an urban flood disaster resilience evaluation index system consisting of four first-level indicators and 20 second-level indicators was constructed from four aspects: basic resistance, disaster prevention and early warning, emergency response, and adaptation recovery. On this basis, subjective and objective weights were assigned to the indicators through the extension analytic hierarchy process and entropy weight method. Combined with the game theory, a new method of urban flood disaster resilience evaluation based on the combined weighting-cloud model was proposed. The verification results of six administrative districts in Nanjing City show that the method can effectively evaluate the resilience level of urban flood disaster. Among the six administrative districts, Jianye District and Jiangning District are high resilience areas, Gulou District and Qinhuai District are relatively high resilience areas, Yuhuatai District is a medium resilience area, and Lishui District is a relatively low resilience area.

Key words: urban resilience; flood disasters; resilience evaluation; cloud model; combined weighting

近年来,极端天气引发的自然灾害事件尤其是洪涝灾害逐渐增多,严重影响城市的公共安全。如何提升城市洪涝灾害韧性,是当今城市发展需要重视的问题之一^[1]。城市洪涝灾害韧性的概念源于韧性研究,“韧性”的概念逐渐从单一视角的工程韧性或生态韧性转向综合多维度视角的社会-生态系统韧性、人地系统恢复能力。韧性作为一种以“弹性恢复”“适应转变”内部或外部影响的系统性思维,为城市系统应对洪涝灾害提供了新思路。国际洪水管理大会主席斯洛博丹·西蒙诺维奇^[1]认为,洪水风险管理和可持续城市发展有着密切的关系,因此提出了一种新的发展模式,即“减少洪灾风险,增强韧性”。虽然国内外学者对城市洪涝灾害韧性

评价已经取得一定的研究成果,但在指标体系构建与评价方法方面仍有进一步研究空间。本文基于城市应对灾害事件的响应过程,从动态视角分析洪涝灾害对城市系统性能的影响,提出了一种基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法,并构建了城市洪涝灾害韧性评价指标体系,以期为提高城市洪涝灾害韧性、增强城市应对洪涝灾害能力提供参考。

1 城市洪涝灾害韧性

20世纪90年代起,韧性概念开始向人类学、灾害学、经济学、社会学、城乡规划等社会科学领域过渡,新的学术概念相继出现。2002年倡导地区可持续发展国际理事会(ICLEI)首次提出“城市韧性”

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3000104);国家自然科学基金项目(52079039);江苏省水利科技项目(2020050)

作者简介:高玉琴(1978—),女,教授,博士,主要从事防洪减灾、水利规划与水利经济研究。E-mail: yqgao@hhu.edu.cn

(urban resilience)议题,旨在提高城市自身的“承灾能力”和“自我恢复能力”^[2]。拥有韧性的城市是指在面对长期或突发性事件时,具备抵御危机能力和维持系统稳定或迅速恢复能力的城市,由此衍生出“城市韧性”的概念^[3]。现有大部分的城市韧性研究成果和政策方向集中在如何应对全球气候变化与自然灾害问题上,即城市灾害韧性研究^[2]。

城市洪涝灾害韧性,是指城市系统承灾体在遭受洪涝灾害时,能够维持城市系统主要功能的正常运转,有效抵御洪涝灾害威胁,在部分子系统遭受破坏后能及时恢复正常功能,并能不断适应、调整城市系统内部结构,以期更好应对下次洪涝灾害的能力^[4]。为进一步阐明城市洪涝灾害韧性的概念,根据文献[5-6]改绘了城市洪涝灾害韧性示意图,如图1所示,图中黑色实线说明了城市系统在处于稳定平衡状态时遭受洪涝灾害的冲击,导致城市系统性能下降和功能受损,需经过一段时间城市系统性能才能恢复至灾前水平;程晓陶等^[6]基于郑州2021年“7·20”特大暴雨水灾调研情况,认为受灾的各大城市仍处于快速城镇化的进程中,基础设施建设处于滞后状态,城市基础抵御能力欠缺,尚未进入平衡状态便遭遇洪涝冲击,因此洪涝灾害发生前城市系统性能状态如图1中红色虚线①所示,而灾后重建与城市洪涝灾害韧性的提高,可以有效降低城市系统受损程度和缩短系统性能恢复至灾前水平的时间,并促进城市性能水平进一步提升,达到满足经济社会发展需求的更高水平,如图1中红色虚线②所示。此外,在城市洪涝灾害韧性方面部分学者已经取得了相关研究成果。例如:陈长坤等^[4]从抵抗力、恢复力与适应力3个方面构建了雨洪灾害情景下的城市韧性指标框架,分析了各个阶段的韧性变化趋势,进而找出城市应对雨洪灾害的薄弱环节;王琳等^[7]从灾害危险程度与城市韧性两个角度出发,对沿海地区的洪涝灾害韧性进行评估,并提出了提升滨海城市洪涝灾害韧性的规划策略;俞茜等^[8]结合韧性城市理论,辨别分析了韧性和脆弱性的区别,提出了狭义洪水韧性和广义洪水韧性的概念;贺

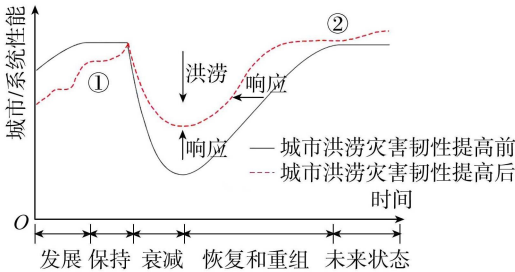


图1 城市洪涝灾害韧性示意图

山峰等^[9]从社会、经济、基础设施和环境4个维度对长三角地区城市洪涝灾害韧性时空演变及其关联性进行了分析,提出了长三角地区城市洪涝灾害韧性在时间序列、空间格局和空间关系3个方面的相关性。

围绕城市洪涝灾害韧性,许多学者在指标体系构建与评价方法创新上都取得了丰富的成果。例如:陈长坤等^[4]从城市韧性的抵抗力、恢复力和适应力三大属性出发,建立了雨洪灾害情景下的城市韧性评价指标体系,包括25个二级指标;贺山峰等^[9]从社会、经济、基础设施和环境4个维度对长三角地区27个城市的洪涝灾害韧性进行评价,研究其时空演变特征及关联性;李亚等^[10]以韧性基线模型为基础,从经济、社会、环境、社区、基础设施及组织6个方面构建了我国城市灾害韧性评价指标体系,对全国288个地级市的灾害韧性进行评估;Cutter等^[11]提出了地方灾害韧性框架(disaster resilience of place, DROP),该框架从自然系统、社会形态、建筑环境3个维度构建了灾害韧性的测度指标体系;Batista等^[12]提出了一套以建筑物尺度为基础的洪水灾害韧性评价指标体系,包括水、交通、通讯等外部因素以及饮用水源、食物等内部因素;Joerin等^[13]从经济、制度、社会、自然和基础5个方面构建了包含25个指标的城市气候灾害韧性评价体系。在评价方法和模型选择方面,学者们普遍采用了专家打分法、层次分析法、ELECTRE法、TOPSIS法、模糊综合评判法等方法。

从以上研究可见,大部分学者都从行政区或国家的层面评价城市洪涝灾害韧性水平及影响因素,但仍存在一定局限:①缺少从城市应对洪涝灾害响应过程的角度构建的韧性指标体系;②采用的指标评价方法往往比较单一,存在仅依靠专家经验评分导致主观性较强或因单纯基于客观数据导致出现评价结果误差较大等问题。因此,基于以上两个方面,本文提出一种基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法。

2 城市洪涝灾害韧性评价指标体系构建

国内外关于城市洪涝灾害韧性的研究大多围绕城市组成子系统选取指标并构建评价体系,如经济、环境、社会、基础设施等^[9-13],评价指标体系中未体现城市系统在面临灾害事件时的适应能力、自我修复能力以及进一步发展的城市属性提升能力。因此,需要建立一种考虑城市抵抗性、预知性、适应性和恢复性的评价指标体系来描述城市系统面对洪涝灾害时的韧性水平。

俞茜等^[8]总结了联合国减少灾害风险办公室

(UNDRR)提出的“使城市更具韧性的十项要素”,将城市应对灾害的过程分为4个阶段:管理规划、灾灾准备、灾害响应和灾后恢复。参考“韧性”的三大要素,即系统抵抗外界干扰的防御能力、遭受冲击后迅速响应的能力和应对同类风险的适应恢复能力^[4],基于国内外相关文献^[4-25],将城市洪涝灾害韧性分为4个方面:基础抵御、防灾预警、应急响应和适应恢复。

基础抵御是指城市系统通过基础设施建设抵御洪涝灾害冲击并减少灾害直接损失的能力,包括城市防洪工程建设、排水设施、城市生态系统建设情况等。防灾预警是指在洪涝灾害发生之前,根据现有情报和数据,归纳总结灾害发生可能性等信息,及时向相关部门及群众报告危险情况,通知各单位做好防灾应急准备,从而最大程度降低洪涝灾害损失的能力。应急响应是指在洪涝灾害发生时,各级单位和社会组织及时、有效地组织、协调和运用各种应急资源,采取一系列措施保障人民群众的生命财产安全和社会稳定的能力。适应恢复是指城市系统在遭受洪涝灾害冲击后,能够快速恢复正常秩序,在此基础上进一步提升城市洪涝灾害韧性的能力。

在已有研究成果^[4-23]的基础上,根据 GB/T 40947—2021《安全韧性城市评价指南》^[24]、ISO 37123《城市可持续发展-韧性城市指标》^[25]以及城市洪涝灾害应急响应过程,从基础抵御、防灾预警、应急响应和适应恢复4个方面构建了城市洪涝灾害韧性的评价指标体系,如图2所示。在该指标体系中,目标层为城市洪涝灾害韧性,准则层由基础抵御、防灾预警、应急响应和适应恢复4个方面构成,指标层共包括20项具体指标,其中“人口密度”“老龄化人口比例(60岁以上)”为负向指标,其余指标为正向指标。

3 基于组合赋权-云模型的评价方法

3.1 可拓层次分析法确定主观权重

选用可拓层次分析法^[26]计算评价指标的主观权重。区别于传统层次分析法,可拓层次分析法引入区间数的概念,在相对重要性不确定时构造判断矩阵,从随机性和模糊性两个角度对指标间的相对重要性进行评判,一定程度上增加了判断的可靠性,从而确定指标的主观权重。通过可拓层次分析法即可得到指标层元素对准则层某一元素的单排序权重,以及确定各元素对目标层的主观权重。

3.2 熵权法确定客观权重

选用熵权法来确定评价指标的初始客观权重。实现步骤如下:

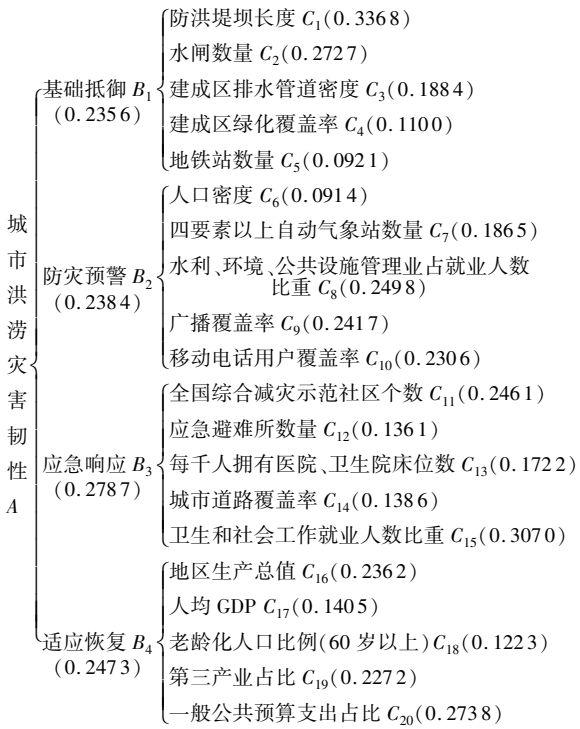


图2 城市洪涝灾害韧性评价指标体系及指标权重

依据各指标类型对原始数据进行归一化处理,运用信息冗余法^[27]确定各个指标的客观权重。一组数据的信息熵 E_j 可由下式计算:

$$E_j = - \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \tag{1}$$

其中

$$p_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij}$$

式中: p_{ij} 为指标 j 在该组数据中的特征比重,即计算指标的变异大小; r_{ij} 为归一化处理后的指标值。为避免 $p_{ij} = 0$ 时出现计算错误,本文确定客观权重归一化最低区间从 0.005 开始。当某一指数的信息熵 E_j 较低时,代表其指数变化程度较高,则可认为该指标对综合评价的影响较大^[28]。最终客观权重为

$$w'_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^n (1 - E_j) \tag{2}$$

式中 w'_j 为指标 j 的客观权重,且各指标权重之和为 1。

3.3 博弈论确定组合权重

运用可拓层次分析法和熵权法分别进行主客观赋权后,根据博弈论再次对两个体系的各评价指标进行组合赋权,这可在一定程度上克服单一方法计算指标权重过于客观或主观的问题。该理论的核心思想是在不同赋权方法确定的权重之间寻找一个平衡点,在保证一致性的同时,使得各指标的组合同权重与各类赋权方法下的基本权重之间的偏差最小^[29]。实现步骤如下:

分别使用可拓层次分析法和熵权法对指标进行赋权,即可得到基本权重组合为

$$\mathbf{w}_k = (w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kn}) \quad (k = 1, 2) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{w}_k$ 为使用 2 种赋权方法得到的指标权重向量; w_{kn} 为 2 种赋权方法评价指标 n 的权重。

记权重向量的任意线性组合为

$$\mathbf{W} = \sum_{k=1}^2 \alpha_k \mathbf{w}_k \quad (4)$$

式中: $\mathbf{W}$ 为所有可能的权重向量; α_k 为线性组合系数, 即不同赋权方法的权重因子。

对式(4)中的系数 α_k 进行优化, 使 $\mathbf{W}$ 与各 $\mathbf{w}_k$ 的离差极小化, 即

$$\min \left\| \sum_{k=1}^2 \alpha_k \mathbf{w}_k - \mathbf{w}_k \right\| \quad (5)$$

根据矩阵的微分性质可得出式(4)的最优化一阶导数条件, 从而求得 α_k , 并对其进行归一化得到 α_k^* 。最终由下式可求得组合权重 $\mathbf{W}^*$:

$$\mathbf{W}^* = \sum_{k=1}^2 \alpha_k^* \mathbf{w}_k \quad (6)$$

3.4 基于组合赋权-云模型的权重确定方法

云模型能够便捷而高效地实现定性和定量的相互转换, 具有将模糊性和随机性结合在一起的特点^[30]。根据“云”的运行机制, 可将云模型分为正向云发生器、逆向云发生器和条件云发生器。不同云模型具有不同的云滴分布形状, 由于正态分布现象在人类社会、统计学及自然界极为普遍, 正态云模型能很好地反映大样本统计量和事态发展的模糊性和不确定性^[31]。

针对正态云模型, 实现定性概念内涵到外延转化的正向云算法通常是固定的, 用于实现概念外延到内涵转化的逆向云算法则根据具体运用情况而各有不同。在逆向云算法的问题研究上, 国内外已有许多相关成果, 如基于一阶绝对中心矩的逆向云算法^[32](SBCT-1stM)、基于四阶绝对中心矩的逆向云算法^[32](SBCT-4thM)以及多步式逆向云变换算法^[33](MBCT-SR)等。以上方法各有优缺点, 其中SBCT-1stM算法是云模型中首个无云滴确定度的逆向云算法, 该算法高效快捷并且容易推广至高维计算, 因此本文选用SBCT-1stM算法, 其计算步骤可见文献^[32]。

在已得组合赋权的基础上, 综合考虑所有专家根据个人经验给出的权重信息, 兼顾指标数据本身存在的客观性和随机性, 提出基于组合赋权-云模型的权重确定方法。其最终权重确定步骤如下:

步骤1 运用可拓层次分析法, 邀请 m 位专家(为使结果更具说服力, $m \geq 10$)对给出体系指标分别进行相对重要性评定, 引入区间数的概念并构造判断矩阵, 通过计算得到 m 位专家对所有指标的主

观权重分配结果。

步骤2 运用熵权法结合客观数据进行计算, 并通过归一化处理得到所有指标的客观权重。

步骤3 利用博弈论, 将运用可拓层次分析法得出的主观权重与采用熵权法得到的客观权重相结合, 得到 M 种组合权重分配结果。

步骤4 运用SBCT-1stM算法, 计算各指标 M 个权重评估值, 得到权重云模型参数, 即期望值、熵和超熵。

步骤5 运用正向云算法随机生成 t 个云滴(生成随机变量, 如 $t = 1\ 500$), 以云滴点确定度 $\mu(x_i)$ 数值最大处所对应的 x_i 作为指标 i 的最后权重值。正向云算法具体公式参考文献^[34]。

步骤6 对 n 个指标的权重值进行归一化处理得到最终的权重向量。

基于组合赋权-云模型的权重计算方法, 可以在已有组合赋予权重的基础上, 通过提取组合权重期望值、熵和超熵, 生成符合主观赋权和客观赋权双重特点的任意数量的评价价值(云滴), 计算得到最终的权重向量, 该权重计算方法增加了权重计算的样本数, 提高了模型可信度。随着随机生成云滴 t 的增大, 基于组合赋权-云模型计算的权重将趋向于模型的期望值。基于组合赋权-云模型计算的权重向量既考虑了专家评价结果的主观性, 也考虑了评价体系指标数据本身存在的客观性, 更在组合赋权的基础上完善了指标权重体系的随机性和模糊性, 对于定性评价权重计算的不确定性方法研究具有一定借鉴意义。

3.5 韧性指数综合评价

计算得到各指标权重后, 采用极差归一化方法对各指标层数据进行处理, 利用综合指数法对评价指标加权计算, 分别得到基础抵御、防灾预警、应急响应和适应恢复 4 个阶段的准则层指数, 并进一步得到城市洪涝灾害韧性指数。计算公式如下:

$$G_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} x'_j \quad (7)$$

$$R = \sum_{i=1}^4 w_i G_i \quad (8)$$

式中: G_i 为 i 准则层指数; x'_j 为归一化处理后的 j 指标数据; w_{ij} 为 j 指标对于 i 准则层的最终权重; R 为城市洪涝灾害韧性指数得分; w_i 为 i 准则层对于目标层的最终权重。

借鉴相关研究的分级方法^[14-23], 结合实例分析, 在计算得到城市洪涝灾害韧性各准则层和韧性指数得分后, 采用自然断点分级法将城市洪涝灾害韧性指数划分为 5 个等级, 依次为低韧性 $[0,$

0.24)、较低韧性[0.24,0.40)、中等韧性[0.40,0.54)、较高韧性[0.54,0.61)和高韧性[0.61,1.00)。该等级划分标准基于江苏省南京市6个行政区的城市洪涝灾害韧性评价指标数据,可供其他城市地区参考。

4 实例验证

4.1 研究区概况

选取洪涝频发的秦淮河水系、石臼湖水系涉及的江苏省南京市鼓楼区、秦淮区、建邺区、雨花台区、江宁区 and 溧水区共6个行政区作为研究区(图3),运用本文提出的城市洪涝灾害韧性评价方法计算城市洪涝灾害韧性指数,并对其城市洪涝灾害韧性情况进行分析。

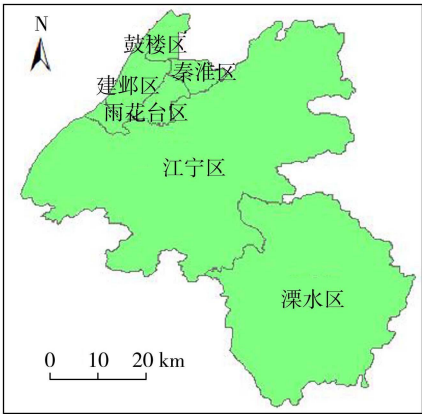


图3 研究区示意图

研究区总面积2960.49 km²,占南京市总面积的44.95%,位于长江、水阳江、秦淮河、滁河等主要流域的下游,承泄着上游180万 km²的洪水,是典型的

“洪水走廊”。研究区降水受季风气候影响显著,季节性分布不均,汛期暴雨或特大暴雨事件、洪涝灾害频发,急需对其城市洪涝灾害韧性进行分析与评价。

4.2 数据获取

根据2000—2022年《南京市统计年鉴》,从考虑人口城镇化率和GDP两个方面选取研究区的城市洪涝韧性评价典型年,考虑新冠疫情对国内的影响,选取2020年作为研究区典型年开展城市洪涝韧性评价分析。研究区内各行政区指标数据来源于91卫图助手卫星地图、《2020年南京市统计年鉴》、南京市各行政区统计年鉴、南京市气象局网、南京市城乡建设委员会网、江苏省水利厅网、《2020中国水利统计年鉴》《中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报》及专家评判。

4.3 指标权重计算

邀请10名专家评估指标权重,通过两两比较定量表示各指标的相对重要程度,并参考吴华清等^[14]基于灾害响应过程的城市洪涝灾害韧性指标权重值,利用可拓层次分析法确定主观权重。在对各指标原始客观数据进行归一化处理后,利用熵权法确定客观权重。运用博弈论理论,分别求出主观权重和客观权重的权重因子,得到10种组合权重分配结果。在得到组合权重的基础上,运用SBCT-1stM中心矩的逆向云算法计算云模型特征值,再使用正向云算法随机模拟1500组指标权重,进行归一化处理后得到最终的权重结果。

重复以上过程,各指标权重云模型图如图4所示,分别求得子体系各指标权重以及对应的总体权

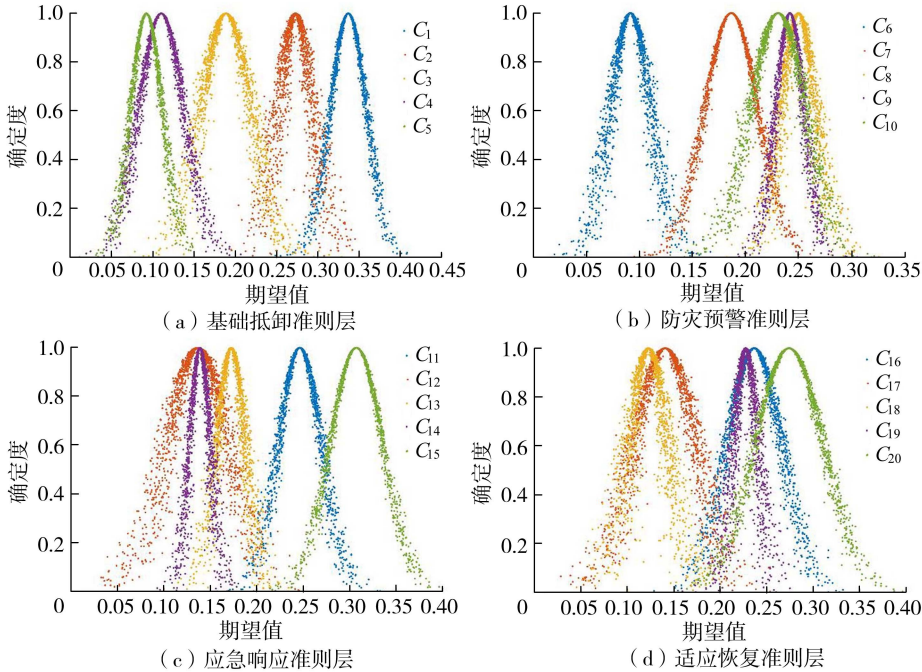


图4 评价指标权重云模型

重(见图2 括号中数据)。

4.4 城市洪涝灾害韧性结果分析

根据计算得到的评价指标权重及云模型参数,对指标层数据进行归一化处理,利用 ArcGIS 进行叠加计算,可得到研究区城市洪涝灾害韧性基础抵御、防灾预警、应急响应和适应恢复准则层指数,使用自然断点分级法将城市洪涝灾害韧性各准则层指数划分为低、较低、中等、较高、高 5 个等级。通过准则层权重及云模型参数,进一步叠加可以得到各行政区的城市洪涝灾害韧性指数和洪涝灾害韧性等级分布情况(表 1),其中建邺区、江宁区为高韧性地区,鼓楼区、秦淮区为较高韧性地区,雨花台区为中等韧性地区,溧水区相比其他行政区而言整体洪涝灾害韧性水平相对较低。

表 1 研究区城市洪涝灾害韧性准则层指数等级

研究区	准则层韧性等级				韧性等级	韧性指数
	基础抵御	防灾预警	应急响应	适应恢复		
鼓楼区	较低	较高	较高	高	较高	0.586 8
秦淮区	较低	高	较高	中等	较高	0.563 7
建邺区	高	较高	中等	较高	高	0.610 4
雨花台区	中等	中等	较低	中等	中等	0.413 9
江宁区	较高	中等	中等	较高	高	0.643 1
溧水区	较高	较低	低	较低	较低	0.291 9

- a.** 从基础抵御准则层角度观察,秦淮区、鼓楼区基础设施抗灾能力相对较弱,尤其是建成区排水管道密度、建成区绿化覆盖率指标与其他行政区有较大差距,且因历史原因,部分雨水管道处于管养缺失的状态,进而出现淤堵、破损等问题,有些甚至已经失去排水能力;建邺区、江宁区以及溧水区因基础设施规划建设相对合理,所以洪涝灾害基础抵御能力相对突出。
- b.** 从防灾预警准则层角度观察,鼓楼区、秦淮区和建邺区得分相对较高,3 个行政区的人口密度相对较大,但城市道路覆盖率与移动电话用户覆盖率较高,水利、环境、公共设施管理业占就业人数比重也较大,在城市洪涝灾害发生前具有较好的预警防控能力;相比而言,雨花台区、江宁区及溧水区在该准则层的得分较低。
- c.** 从应急响应准则层角度观察,鼓楼区和秦淮区的医疗资源相对集中,应急响应措施也较为完善,有足够的应急避难场所和社区服务保障;建邺区、江宁区 and 雨花台区的全国综合减灾示范社区个数、应急避难场所数量与分值较高的鼓楼区、秦淮区相差不大,但医疗资源的分布较为分散,卫生和社会工作就业比重相对较低;
- d.** 从适应恢复准则层角度观察,经济指标占据较大的比重,鼓楼区、秦淮区与江宁区的地区生产总

值和第三产业占比相较于其他行政区比较突出,但建邺区在人均 GDP 指标上有明显优势,其中江宁区在各个指标中的表现较为良好,另外,鼓楼区和秦淮区的人口老龄化问题相较于其他行政区更为严重,这也间接导致城市系统在面对洪涝灾害后适应恢复的能力下降。

鼓楼区在发布的“十四五”发展规划中强调要全面打造“安全韧性标杆区”。随着城镇化的进一步发展,高水平城市化地区如鼓楼区、秦淮区、建邺区虽然承灾体易损性较高,人口活动相对密集,但作为南京市经济、金融和文化中心,第三产业和医疗资源集中,有较强的灾害应急响应能力和灾后适应恢复能力;江宁区从东西南三面环抱南京主城,随着 2000 年江宁撤县设区,江宁区城市化和信息化进程加快,主城区人口大量向江宁区转移,基础建设不断完善,服务业进入快速发展时期,至 2021 年江宁区规上服务业营业收入超 900 亿元,基础防御能力、医疗卫生保障、灾后经济恢复能力都在逐步提升,使得江宁区已具有较高的城市韧性水平;雨花台区是以软件和信息服务、科技服务为主导的国家新型工业化示范基地,第三产业发展迅速,但在基础设施建设、教育、医疗资源等方面与主城区仍存在差距,整体城市韧性处于中等水平;2013 年经江苏省政府批复同意撤销溧水县,设立南京市溧水区,相比南京市其他行政区,溧水区城市化水平较低,地区生产总值以第一、二产业为主,虽然承灾体易损性、孕灾环境敏感性较低,但基础设施建设、经济发展能力也因此相对欠缺,导致整体洪涝灾害韧性水平较低。通过以上分析可知,本文评价结果与研究区实际洪涝灾害韧性情况相适应,具有较高的可信度和参考价值,可为各有关部门提高城市洪涝灾害韧性提供决策依据和建议。

4.5 建议与措施

研究区城市洪涝灾害韧性各准则层指数在一定程度上反映了各行政区面对洪涝灾害时的薄弱环节,为提高城市系统洪涝灾害韧性,针对各准则层的得分情况和具体指标,提出以下建议:

a. 加强堤坝建设,提升建成区绿化覆盖率,明确鼓楼区、秦淮区及建邺区等高水平城市化地区的排水管网养护标准,提高地下雨水管网设施管养水平和覆盖率,从而保障雨水管网汛期排水安全。

b. 做好极端暴雨、洪涝灾害的预警工作,提高降雨数据精度,通过大数据平台建设针对洪涝灾害的实时预警系统。

c. 继续加强全国综合减灾示范社区建设,提升居民群众的防灾意识和应灾能力,合理规划医疗资

源的地区分布,使各个片区可以及时对灾情做出响应,避免出现部分地区医疗资源过度密集和相对过剩的问题。

d. 完善社会保障制度,稳步提高一般公共预算支出,改善居民生活水平。

5 结 语

本文基于城市系统受洪涝灾害响应过程,从基础抵御、防灾预警、应急响应和适应恢复 4 个方面建立了城市洪涝灾害韧性评价指标体系,共包含 4 个一级指标和 20 个二级指标。采用可拓层次分析法和熵权法得到主观权重和客观权重,结合博弈论理论,构建了组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法。以南京市 6 个行政区为例对该方法进行验证,结果表明:建邺区、江宁区为高韧性地区,鼓楼区、秦淮区为较高韧性地区,雨花台区为中等韧性地区,溧水区为较低韧性地区。评价结果与研究区实际情况相符,具有较高的可信度和一定参考价值。建邺区各准则层得分较高;鼓楼区、秦淮区在防灾预警、应急响应和适应恢复能力方面水平较高,但在基础抵御方面有待进一步提高;江宁区虽整体洪涝灾害韧性水平较高,但防灾预警和应急响应方面仍需提高完善;雨花台区和溧水区的各项指标得分在研究区中相对较低,需进一步推动城市洪涝灾害韧性建设进程。

参考文献:

[1] 斯洛博丹·西蒙诺维奇. 从洪水风险管理到韧性管理: 评估全球变化环境下一种新的适应性方法[J]. 中国防汛抗旱,2019,29(2):6-7. (SIMONOVIC S P. From risk to resilience of flood management;a new way to assessing adaptation of flood management to globally changing conditions [J]. China Flood & Drought Management, 2019,29(2):6-7. (in Chinese))

[2] 王艳,孙志远,熊湘辉. 韧性城市研究知识图谱:基于 CiteSpace 和 Bicom 的分析[J]. 南方农机,2021,52(23):30-33. (WANG Yan, SUN Zhiyuan, XIONG Xianghui. The knowledge map of urban resilience:based on CiteSpace and Bicom[J]. China Southern Agricultural Machinery,2021,52(23):30-33. (in Chinese))

[3] 张家玉,杨晓冬. 三度空间理念下城市韧性评价与提升策略研究[J]. 工程管理学报,2021,35(6):55-60. (ZHANG Jiayu, YANG Xiaodong. Urban resilience evaluation and promotion strategy: a perspective of trio spaces[J]. Journal of Engineering Management,2021,35(6):55-60. (in Chinese))

[4] 陈长坤,陈以琴,施波,等. 雨洪灾害情境下城市韧性评估模型[J]. 中国安全科学学报,2018,28(4):1-6.

(CHEN Changkun, CHEN Yiqin, SHI Bo, et al. An model for evaluating urban resilience to rainstorm flood disasters [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28 (4) : 1-6. (in Chinese))

[5] LINNENLUECKE M, GRIFFITHS A. Beyond adaptation: resilience for business in light of climate change and weather extremes [J]. Business & Society, 2010, 49 (3) : 477-511.

[6] 程晓陶,刘昌军,李昌志,等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J]. 水利学报,2022,53(7):757-768. (CHENG Xiaotao, LIU Changjun, LI Changzhi, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (7) : 757-768. (in Chinese))

[7] 王琳,朱一荣,王睿. 滨海城市水灾害韧性评价与规划策略[C]//中国城市规划学会,杭州市人民政府. 共享与品质:2018 中国城市规划年会论文集(01 城市安全与防灾规划). 杭州:中国建筑工业出版社,2018:426-437.

[8] 俞茜,李娜,王艳艳. 基于韧性理念的洪水管理研究进展[J]. 中国防汛抗旱,2021,31(8):19-25. (YU Qian, LI Na, WANG Yanyan. Review of flood management based on the concept of resilience [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31 (8) : 19-25. (in Chinese))

[9] 贺山峰,梁爽,吴绍洪,等. 长三角地区城市洪涝灾害韧性时空演变及其关联性分析[J]. 长江流域资源与环境,2022,31(9):1988-1999. (HE Shanfeng, LIANG Shuang, WU Shaohong, et al. Analysis on spatio-temporal evolution and relevance of urban flood disaster resilience in Yangtze River Delta [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31 (9) : 1988-1999. (in Chinese))

[10] 李亚,翟国方. 我国城市灾害韧性评估及其提升策略研究[J]. 规划师,2017,33(8):5-11. (LI Ya, ZHAI Guofang. China's urban disaster resilience evaluation and promotion [J]. Planners, 2017, 33 (8) : 5-11. (in Chinese))

[11] CUTTER S L, BARNES L, BERRY M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters[J]. Global Environmental Change, 2008, 18(4):598-606.

[12] BATICA J, GOURBESVILLE P. Flood resilience index- methodology and application [C] // Proceedings of the 11th International Conference on Hydroinformatics. New York: HIC, 2014.

[13] JOERIN J, SHAW R, TAKEUCHI Y, et al. The adoption of a climate disaster resilience index in Chennai, India [J]. Disasters, 2014, 38 (3) : 540-561.

[14] 吴华清,方建,栾一博. 基于灾害响应过程的城市洪涝灾害韧性评价[C]//面向高质量发展的空间治理: 2021 中国城市规划年会论文集(01 城市安全与防灾规划). 成都:中国城市规划学会,2021:368-378.

- [15] 刘泽照,马瑞. 防灾减灾视域下城市韧性评价体系构建及应用:基于江苏省 13 个城市研究[J]. 中国应急管理科学, 2021 (5): 27-41. (LIU Zezhao, MA Rui. Construction and application of urban resilience evaluation system in disaster prevention and mitigation perspective: based on panel data of 13 cities in Jiangsu Province[J]. Journal of China Emergency Management Science, 2021 (5):27-41. (in Chinese))
- [16] 陈娜,郭浩然,张志鹏,等. 基于 H-OWA 算子和投影寻踪的地铁站水灾安全韧性评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33 (4): 148-154. (CHEN Na, GUO Haoran, ZHANG Zhipeng, et al. Evaluation of subway station flood safety resilience based on H-OWA operator and projection pursuit[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33 (4): 148-154. (in Chinese))
- [17] 焦柳丹,邓佳丽,吴雅,等. 基于 PSR+云模型的城市韧性水平评价研究[J]. 生态经济, 2022, 38 (5): 114-120. (JIAO Liudan, DENG Jiali, WU Ya, et al. Evaluation of urban resilience based on PSR+Cloud model[J]. Ecological Economy, 2022, 38 (5): 114-120. (in Chinese))
- [18] 嵇娟,陈军飞,周子月. 江苏省城市洪涝韧性评价及影响因素研究[J]. 水利经济, 2022, 40 (4): 48-54. (JI Juan, CHEN Junfei, ZHOU Ziyue. Research on evaluation and influencing factors of urban flood resilience in Jiangsu Province[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40 (4): 48-54. (in Chinese))
- [19] 许兆丰,田杰芳,张靖. 防灾视角下城市韧性评价体系及优化策略[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29 (3): 1-7. (XU Zhaofeng, TIAN Jiefang, ZHANG Jing. Urban resilience evaluation system and optimization strategy from perspective of disaster prevention [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29 (3): 1-7. (in Chinese))
- [20] 白立敏,修春亮,冯兴华,等. 中国城市韧性综合评估及其时空分异特征[J]. 世界地理研究, 2019, 28 (6): 77-87. (BAI Limin, XIU Chunliang, FENG Xinghua, et al. A comprehensive assessment of urban resilience and its spatial differentiation in China [J]. World Regional Studies, 2019, 28 (6): 77-87. (in Chinese))
- [21] 宋英华,施申亮. 韧性视角下的城市区域洪涝承灾能力评估方法研究[J]. 工业安全与环保, 2022, 48 (6): 33-37. (SONG Yinghua, SHI Shenliang. Methodology study on the evaluation for flood disaster-bearing capability of urban area: a resilience perspective [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2022, 48 (6): 33-37. (in Chinese))
- [22] 李雯,姜仁贵,解建仓,等. 基于系统动力学的城市内涝灾害应急管理模型[J]. 水资源保护, 2022, 38 (5): 51-57. (LI Wen, JIANG Rengui, XIE Jiancang, et al. Emergency management model of urban waterlogging disaster based on system dynamics[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (5): 51-57. (in Chinese))
- [23] 李正兆,傅大放,王君娟,等. 应对内涝灾害的城市韧性评估模型及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62 (2): 266-276. (LI Zhengzhao, FU Dafang, WANG Junxian, et al. Urban resilience assessment model for waterlogging disasters and its application [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62 (2): 266-276. (in Chinese))
- [24] 王皖,李瑞奇,徐凤娇,等. GB/T 40947-2021《安全韧性城市评价指南》国家标准解读[J]. 标准科学, 2022 (11): 84-86. (WANG Wan, LI Ruiqi, XU Fengjiao, et al. Interpretation of GB/T 40947-2021, Guide for safety resilient city evaluation [J]. Standard Science, 2022 (11): 84-86. (in Chinese))
- [25] 杨锋. ISO 37123《城市可持续发展 韧性城市指标》解读[J]. 标准科学, 2019 (8): 11-16. (YANG Feng. Analysis of ISO 37123, Sustainable cities and communities: indicators for resilient cities [J]. Standard Science, 2019 (8): 11-16. (in Chinese))
- [26] 闫东方. 可拓层次分析法及其应用[D]. 大连:大连海事大学, 2012.
- [27] 张霖,黄航行,俞雅蓉,等. 基于熵权法的武威市河长制考核评价研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40 (增刊 2): 6-10. (ZHANG Ji, HUANG Hangxing, YU Yarong, et al. Evaluation of river head system in Wuwei based on entropy weight method [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40 (Sup2): 6-10. (in Chinese))
- [28] 郭金,顾冲时,何菁. 基于组合赋权二维云模型的堤防工程风险评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (6): 117-122. (GUO Jin, GU Chongshi, HE Jing. Risk assessment for levee engineering based on a two-dimensional cloud model with combination weighting [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (6): 117-122. (in Chinese))
- [29] 路遥,徐林荣,陈舒阳,等. 基于博弈论组合赋权的泥石流危险度评价[J]. 灾害学, 2014, 29 (1): 194-200. (LU Yao, XU Linrong, CHEN Shuyang, et al. Combined weight method based on game theory for debris flow hazard risk assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29 (1): 194-200. (in Chinese))
- [30] 王肖鑫,岑威钧,晏成明,等. 基于改进赋权的山区堤防安全云模型评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (5): 58-63. (WANG Xiaoxin, CEN Weijun, YAN Chengming, et al. Cloud model evaluation method of levee safety in mountain area based on improved weighting [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (5): 58-63. (in Chinese))
- [31] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6 (8): 28-34. (LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model [J]. Engineering Science, 2004, 6 (8): 28-34. (in Chinese))

(下转第 36 页)

- Science, 2022, 33(5): 826-834. (in Chinese))
- [9] 徐卫亚,秦创创,张贵科,等. 基于分流比的复杂分汊河道滑坡涌浪远场传播计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (3): 20-24. (XU Weiya, QIN Chuangchuang, ZHANG Guike, et al. Calculation method for far-field propagation of landslide surge based on flow diversion ratio of a bifurcated river[J]. Advances Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 20-24. (in Chinese))
- [10] 黄瑞启,黄筱云,张少强,等. 水上滑坡冲击涌浪的远场传播特征数值模拟分析[J]. 水利水电科技进展,2023, 43 (1): 36-42. (HUANG Ruiqi, HUANG Xiaoyun, ZHANG Shaoqiang, et al. Numerical simulation analysis on far-field propagation characteristics of impulse waves generated by subaerial landslides [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (1):36-42. (in Chinese))
- [11] ATAIE-ASHTIANI B, NIK-KHAH A. Impulsive waves caused by subaerial landslides [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2008, 8(3): 263-280.
- [12] ZITTI G, ANCEY C, POSTACCHINI M, et al. Impulse waves generated by snow avalanches: momentum and energy transfer to a water body [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2016, 121(12): 2399-2423.
- [13] HELLER V, HAGER W H. Impulse product parameter in landslide generated impulse waves [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2010, 136(3): 145-155.
- [14] MCFALL B C, MOHAMMED F, FRITZ H M, et al. Laboratory experiments on three-dimensional deformable granular landslides on planar and conical slopes [J]. Landslides, 2018, 15(9): 1713-1730.
- [15] ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 23(1): 261-304.
- [16] FRITZ H M, HAGER W H, MINORH E. Landslide generated impulse waves [J]. Experiments in Fluids, 2003, 35(6): 505-519.
- [17] VIROULET S, SAURET A, KIMMOUN O, et al. Granular collapse into water: toward tsunami landslides [J]. Journal of Visualization,2013, 16(3):189-191.
- [18] MULLIGAN R P, TAKE W A. On the transfer of momentum from a granular landslide to a water wave[J]. Coastal Engineering, 2017, 125: 16-22.
- [19] 陈小婷,黄波林,王健,等. 基于粒子图像测速技术的滑坡-涌浪两相运动分析系统[J]. 地质力学学报, 2020, 26 (4): 492-499. (CHEN Xiaoting, HUANG Bolin, WANG Jian, et al. Two-phase motion analysis system for landslide-induced impulse wave based on the particle image velocimetry[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(4):492-499. (in Chinese))
- [20] YAVARI-RAMSHE S, ATAIE-ASHTIANI B. Numerical modeling of subaerial and submarine landslide-generated tsunami waves: recent advances and future challenges[J]. Landslides, 2016, 13(6): 1325-68.
- [21] ANDREIN I N, EPELY-CHAUVIN G, ANCEY C. Internal dynamics of Newtonian and viscoplastic fluid avalanches down a sloping bed [J]. Physics of Fluids, 2012, 24(5): 053101.
- [22] CREMONESI M, FRANGI A, PEREGO U. A Lagrangian finite element approach for the simulation of water-waves induced by landslides[J]. Computers & Structures,2011, 89(11/12):1086-1093.
- [23] ZHA O L, MAO J, BAI X, et al. Finite element simulation of impulse wave generated by landslides using a three-phase model and the conservative level set method [J]. Landslides,2016,13(1):85-96.
- [24] MENG Z. Experimental study on impulse waves generated by a viscoplastic material at laboratory scale [J]. Landslides, 2018, 15(6): 1173-1182.
- [25] MENG Z,LI X,HAN S,et al. The motion and deformation of viscoplastic slide while entering a body of water[J]. J Mar Sci Eng,2022(10): 778.
- [26] MENG Z,ZHANG J,HU Y,et al. Temporal prediction of landslide-generated waves using a theoretical-statistical combined method[J].J Mar Sci Eng, 2023(11): 1151.
- [27] MENG Z, ANCEY C. The effects of slide cohesion on impulse-wave formation [J]. Experiments in Fluids, 2019, 60(10): 1-4.
- [28] MEN G Z, HU Y, ANCEY C. Using a data driven approach to predict waves generated by gravity driven mass flows[J]. Water, 2020, 12(2): 600.

(收稿日期:2023-04-15 编辑:骆超)

(上接第 29 页)

- [32] 刘常昱,冯芒,戴晓军,等. 基于云 X 信息的逆向云新算法[J]. 系统仿真学报,2004,16(11):2417-2420. (LIU Changyu, FENG Mang, DAI Xiaojun, et al. A new algorithm of backward cloud [J]. Journal of System Simulation,2004,16(11):2417-2420. (in Chinese))
- [33] XU Changlin, WANG Guoyin, ZHANG Qinghua. A new multi-step backward cloud transformation algorithm based on normal cloud model [J]. Fundamenta Informaticae, 2014,133(1):55-85.
- [34] 杨洁,王国胤,刘群,等. 正态云模型研究回顾与展望 [J]. 计算机学报,2018,41(3):724-744. (YANG Jie, WANG Guoyin, LIU Qun, et al. Retrospect and prospect of research of normal cloud model [J]. Chinese Journal of Computers,2018,41(3):724-744. (in Chinese))

(收稿日期:2023-04-01 编辑:俞云利)