

考虑内涝周期的郑州市内涝韧性评估

刘明阳¹, 王群英², 徐向舟¹, 李敏¹, 吴润祺¹

(1. 大连理工大学建设工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要:基于城市内涝发生前、中、后期特征,将韧性理论引入城市内涝治理,构建郑州市内涝韧性体系,利用可变模糊集、贡献度和障碍度建立评估模型,分析了郑州市内涝韧性变化规律及主要影响因素。结果表明:2001—2020年,郑州市初期内涝韧性水平较高,但随着“城市病”逐渐突出,韧性水平由2001年的3.2下降到2020年的2.9,处于可以通过自我调节恢复到原始状态的韧性一般水平;系统层中前期内涝韧性在城市内涝韧性体系中具有重要作用,平均贡献度为41%;城市排水管网是内涝韧性发展中最主要的关键限制因素,平均障碍度为16%;公共交通服务能力等次要限制因素也是提升城市内涝韧性水平不可忽视的一部分,其障碍度之和较关键限制因素高出15%;郑州市城市内涝韧性水平一般,需在城市排水管网等方面加强以提升内涝韧性。

关键词:城市内涝韧性;可变模糊集;贡献度;障碍度;郑州市

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)04-0048-08

Assessment of waterlogging resilience in Zhengzhou City considering waterlogging cycle//LIU Mingyang¹, WANG Qunying², XU Xiangzhou¹, LI Min¹, WU Runqi¹(1. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: Based on the characteristics of urban waterlogging before, during, and after its occurrence, the resilience theory was introduced into urban waterlogging management, and waterlogging resilience system in Zhengzhou City was constructed. An assessment model was established using variable fuzzy sets, contribution degree, and obstacle degree to analyze the changes in the waterlogging resilience of Zhengzhou City and the main influencing factors. The results showed that from 2001 to 2020, the waterlogging resilience level of Zhengzhou City was relatively high in the initial stage. However, as the “urban disease” gradually became prominent, the resilience level decreased from 3.2 in 2001 to 2.9 in 2020, reaching a moderate resilience level that can be restored to its original state through self-regulation. The early stage of waterlogging resilience in the system layer played an important role in the urban waterlogging resilience system, with an average contribution of 41%. The urban drainage network was the most critical limiting factor in the development of waterlogging resilience, with an average obstacle degree of 16%. The limiting factors including public transportation service capacity were also an indispensable part of improving the resilience level of urban waterlogging, and the sum of its obstacles was 15% higher than the key limiting factors. The level of urban waterlogging resilience of Zhengzhou City is average, and it is necessary to strengthen the urban drainage network and other aspects to enhance the resilience of waterlogging.

Key words: urban waterlogging resilience; variable fuzzy set; contribution degree; obstacle degree; Zhengzhou City

城市的快速发展与内涝灾害频发是目前社会发展的一大突出矛盾^[1]。现代城市是一个复杂系统,一旦内涝灾害破坏达到临界点,会带来众多衍生灾害并造成巨大损失^[2]。近年来,基于韧性的内涝管理方法为城市提供了新的可行方案^[3]。联合国国际减灾战略给出了韧性的定义:韧性为系统、社会或社区面临灾害干扰时具有的抵抗、吸收、适应某种灾害并从中恢复的一种能力^[4]。城市内涝韧性评估

作为内涝韧性城市建设的重要环节,是韧性理念与实际连接的桥梁,也是拟定政策的前提和基础。现阶段,韧性已经发展成为一个综合概念,涵盖了灾害管理周期的所有阶段,目前城市内涝韧性研究主要集中在内涝韧性的框架构建^[5]、定量评估^[6]和影响因素^[7]等方面。其中,韧性评估是城市内涝韧性管理的基础性工作,一般利用系统性能曲线和指标体系等方法研究。结合水文或水力模型的模拟结果,

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3702302);辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101300008)

作者简介:刘明阳(1995—),男,博士研究生,主要从事城市洪涝灾害防治研究。E-mail:liumy@mail.dlut.edu.cn

通信作者:徐向舟(1969—),男,教授,博士,主要从事水土保持与可持续发展研究。E-mail:xzxu@dlut.edu.cn

系统性能曲线法能够准确和客观地评价内涝韧性变化规律;指标体系法常选取内涝韧性相关指标构建体系,主要用于城市或城市群尺度在大时间跨度下的内涝韧性量化和对比,是目前较为常用的方法^[8]。但在已有研究中,一些韧性模型只考虑灾害等负面因素的影响,忽略了韧性在内涝不同阶段的区别,尤其是没有考虑灾后阶段恢复能力的影响^[9-10]。另外,用于呈现内涝灾害的地理、水文和社会经济等指标具有多样性、复杂性、不确定性和不准确性等特点^[11-12],可能导致利用传统精确数学解决这类模糊问题时产生一定误差,不能完整揭示城市内涝韧性系统的真正性能。同时,由于城市内涝韧性定义的模糊性和多维性,韧性评估模型的建立可能面临因素考虑不完全、因素与韧性关系存在争议等问题。因此,建立能够准确评估城市内涝韧性能力并被学者和机构接受的模型仍然是一个挑战。

鉴于此,本文拟从城市内涝周期的角度构建郑州市韧性评估指标体系,利用可变模糊集理论研究城市内涝韧性变化,准确剖析限制城市内涝韧性的主要指标,以期对郑州市城市内涝韧性的科学评估及优化管理提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

郑州市位于河南省中北部山前平原,属于温带大陆性季风气候,年平均降水量为 542.2 mm,雨岛效应日渐突出,且集中在汛期^[13]。由于特殊的地理位置和气候条件,暖湿气流在山前平原抬升形成地形雨,导致郑州市历史上极端暴雨频发,饱受洪水的侵扰。郑州市近些年已成为人口千万、GDP 过万亿的国家中心城市和中原城市群的核心城市。然而城区一旦遭受极端降雨往往会形成大面积的地表汇流,远超城市排水设施和防洪设施所能应对的能力。2021 年郑州市发生了一场特大内涝,最大降水量为 201.9 mm/h,造成了 380 人死亡,直接经济损失 409 亿元,占全省损失 34.1%^[14]。该事件揭示了我国特大城市在内涝防范、危险感知和应急救援等方面存在诸多问题^[15-16]。

1.2 数据来源

本文指标体系包括定量指标和模糊定性指标,研究时段为 2001—2020 年。定量指标原始数据来自《中国城市统计年鉴》《郑州市统计年鉴》等统计年鉴,缺失数据根据实际情况利用多重插补法进行填补处理。气象数据来自国家气象信息中心中国气象数据网的中国地面气候资料逐日数据集(<http://data.cma.cn>)。自然消纳能力和建成区暴露程度来

自中国科学院地理科学与资源研究所的中国多时期土地利用/土地覆盖遥感监测数据(<http://www.resdc.cn>)。此外,为方便模糊定性数据识别计算,根据实际情况和专家意见对定性指标定量化处理。

2 研究方法

2.1 评估指标体系

基于已有研究成果^[1,12,17-18],本文认为考虑内涝周期(即内涝前期、内涝中期和内涝后期)的城市韧性可以理解为:当城市系统受到暴雨内涝影响时,系统及子系统有效地抵抗、吸收、适应内涝灾害并从中恢复的能力,即通过前期抗洪、中期应对、后期恢复和适应其基本结构和功能的能力。根据科学性、代表性、实用性和可操作性原则,构建城市内涝韧性评估指标体系如图 1 所示,括号内数值为指标权重。由于评估指标体系中混合了定量指标和模糊定性指标,有些指标无法用精确的数据来评估,本文采用重要性概念的模糊语气算子与相对隶属关系来确定指标权重向量,从而增加专家评估的灵活性^[19]。首先,对指标层建立排序一致性的二元比较矩阵 E ;其次,对矩阵 E 每行求和并由大到小排列,给出指标层关于重要性的排序;最后,运用经验知识,确定指标层对模糊性概念重要性的相对隶属关系,得到归一化指标权重向量。

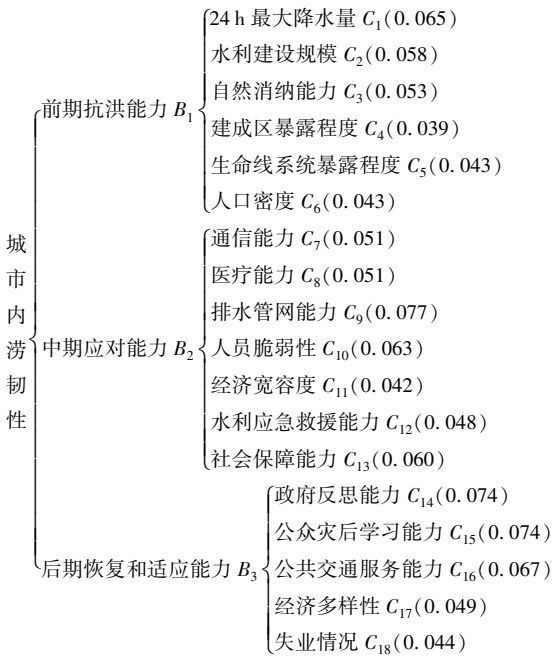


图 1 城市内涝韧性评估指标体系

Fig.1 Assessment index system of urban waterlogging resilience

指标层中,24 h 最大降水量代表城市受到降雨影响的风险^[20]。水利建设规模代表城市面对内涝灾害时水利管理的能力,以年水利方面支出占公共

预算总支出比例表示^[21]。自然消纳能力代表城市净化地表径流、帮助雨水自然渗透和储存洪水的能
力,以城市绿地和水体面积占城市总面积比例表示^[22]。建成区暴露程度代表城市建筑物和内部人员的暴露情况,以城市建筑面积占城市总面积比例表示^[22]。生命线系统暴露程度代表城市生命线基础设施的风险和带来次生影响的潜在风险,为模糊指标。人口密度以城市总人口密度占城市总面积比例表示^[22]。通信能力代表城市内涝灾情传递的速度,以年底移动电话和互联网入户数与城市总人口之比表示^[23]。医疗能力代表城市救治伤员的能力,以年末医院床位数与城市总人口之比表示^[24]。排水管网能力代表内涝灾害发生时城市排水排涝的能力,以城市排水系统长度与城市总面积之比表示^[25]。人员脆弱性代表城市易受内涝影响的潜在人群,以 15 岁以下和 65 岁以上人口之和占城市总人口比例表示^[23]。经济宽容度代表城市家庭经济应对内涝影响的能力,为模糊指标。水利应急救援能力代表城市应急部门对内涝灾害反应能力,为模糊指标。社会保障能力代表城市对内涝后的居民生活补助能力,为模糊指标。政府反思能力代表城市对内涝后的出台政策、规划和反思的能力,为模糊指标。公众灾后学习能力代表居民对内涝潜在影响应对的提升,为模糊指标。公共交通服务能力代表内涝后城市经济快速复苏的能力,以公共交通工具和出租车数量与城市总人口之比表示^[26]。经济多样性表示从洪水中恢复的经济能力,以第三产业生产总值占国内生产总值比例表示^[27]。失业情况代表居民受到内涝影响失业可能性的大小,以城市失业人数占城市年末从业人数比例表示^[28]。此外,城市内涝韧性评估指标目前尚无明确的统一标准,本文在参考国家标准 GB/T 40947—2021《安全韧性城市

评估指南》基础上,结合郑州市自然地理、水文气象条件、社会经济及其受到洪灾影响的实际情况和特点,确定各项具体指标的分级标准,具体见表 1。

2.2 评估模型构建

可变模糊集理论通过特殊参数的搭配,合理地确定各类指标对评价分级标准的相对隶属度,有效地解决了计算中边界模糊问题,提高了对样本评估等级的准确性^[19]。本文将模糊数学中可变模糊集理论应用到城市内涝韧性评估中,设城市内涝韧性单元系统中有 l 年,每年有 m 个指标,每个指标分为 c 个等级,则有样本特征值矩阵 $X=(x_{ij})$,指标特征值矩阵 $Y=(y_{ih})$,其中 $1\leq i\leq m,1\leq j\leq l,1\leq h\leq c$ 。由于城市内涝韧性指标特征值、样本特征值量纲不同,针对不同的指标类型,采用下式对其进行规格化处理:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \geq y_{ic} \text{ (递增型)}, x_{ij} \leq y_{ic} \text{ (递减型)} \\ \frac{y_{ic} - x_{ij}}{y_{ic} - x_{i1}} & \text{ (递增或递减型)} \\ 1 & x_{ij} \leq y_{i1} \text{ (递增型)}, x_{ij} \geq y_{i1} \text{ (递减型)} \end{cases} \tag{1}$$

$$s_{ih} = \begin{cases} 0 & y_{ih} = y_{ic} \text{ (递增或递减型)} \\ \frac{y_{ic} - y_{ih}}{y_{ic} - y_{i1}} & \text{ (递增或递减型)} \\ 1 & y_{ih} = y_{i1} \text{ (递增或递减型)} \end{cases} \tag{2}$$

式中: r_{ij} 为样本 j 指标 i 特征值对模糊概念的规格化数; y_{i1} 、 y_{ih} 、 y_{ic} 分别为指标 i 的 1 级、 h 级、 c 级标准特征值; s_{ih} 为级别 h 指标 i 标准特征值 y_{ih} 的规格化数; x_{ij} 为样本 j 指标 i 的特征值。递增型表示从 1 级至 c 级指标标准特征值递增的指标,递减型表示从 1 级至 c 级指标标准特征值递减的指标。

城市内涝韧性的特征值计算公式为

表 1 城市内涝韧性评估指标分级标准

Table 1 Classification criteria for urban waterlogging resilience assessment indicators

级别	C_1/mm	$C_2/\%$	$C_3/\%$	$C_4/\%$	C_5	$C_6/(\text{万人}/\text{km}^2)$	$C_7/(\text{部}/\text{人})$	$C_8/(\text{张}/\text{万人})$	$C_9/(\text{km}/\text{km}^2)$
I	>200	≤ 0.2	≤ 30	>70	5	>5000	≤ 0.60	$\geq 50 \sim 60$	≤ 4
II	>140 ~ 200	>0.2 ~ 0.47	>30 ~ 40	>50 ~ 70	4	>4000 ~ 5000	>0.60 ~ 0.75	>60 ~ 70	>4 ~ 8
III	>100 ~ 140	>0.47 ~ 0.74	>40 ~ 50	>30 ~ 50	3	>3000 ~ 4000	>0.75 ~ 0.85	>70 ~ 85	>8 ~ 12
IV	>70 ~ 100	>0.74 ~ 1	>50 ~ 60	>20 ~ 30	2	>2000 ~ 3000	>0.85 ~ 0.95	>85 ~ 100	>12 ~ 16
V	≤ 70	>1	>60	≤ 20	1	≤ 2000	>0.95	>100	>16
级别	$C_{10}/\%$	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	$C_{16}/(\text{辆}/\text{万人})$	$C_{17}/\%$	$C_{18}/\%$
I	>50	1	1	1	1	1	≤ 8	≤ 20	>6
II	>40 ~ 50	2	2	2	2	2	>8 ~ 10	>20 ~ 35	>5 ~ 6
III	>30 ~ 40	3	3	3	3	3	>10 ~ 13	>35 ~ 50	>4 ~ 5
IV	>20 ~ 30	4	4	4	4	4	>13 ~ 15	>50 ~ 65	>3 ~ 4
V	≤ 20	5	5	5	5	5	>15	>65 ~ 80	≤ 3

注:每个模糊指标按级别程度划分成的 5 个韧性等级依次取值 1、2、3、4、5^[29],如生命线系统暴露程度 C_5 的 5 个级别(弱、较弱、一般、较强和强)依次取值 1、2、3、4、5。

$$H_j = \sum_{h=1}^c h u_{hj} \quad (3)$$

其中

$$u_{hj} = \begin{cases} \left\{ \frac{\sum_{k=e_j}^{f_j} \left[\frac{\sum_{i=1}^m (w_i |r_{ij} - s_{ih}|)^p}{\sum_{i=1}^m (w_i |r_{ij} - s_{ik}|)^p} \right]^{\frac{a}{p}}}{\sum_{k=e_j}^{f_j} 1} \right\}^{-1} & e_j \leq h \leq f_j \\ 0 & 1 \leq h \leq e_j \text{ 或 } f_j < h \leq c \end{cases}$$

式中: H_j 为样本 j 的城市内涝韧性特征值; u_{hj} 为样本 j 对级别 h 的相对隶属度; w_i 为指标权重; f_j 、 e_j 分别为样本 j 的级别上限值与级别下限值; a 为优化准则参数, $a=1$ 为最小一乘方准则, $a=2$ 为最小二乘方准则; p 为距离参数, $p=1$ 为海明距离, $p=2$ 为欧氏距离; k 为稳定性等级参数。

根据城市内涝韧性的特征值 H 将城市内涝韧性水平分为弱、较弱、一般、较强、强 5 个级别。1.0 ≤ H < 1.5 为 I 级, 韧性弱, 表示一旦系统遭受外部损害, 系统就会努力通过自我调节来恢复平衡; 1.5 ≤ H < 2.5 为 II 级, 韧性较弱, 表示受到外界的影响后, 系统可以恢复自身的平衡, 但需要很长时间, 且速度较慢; 2.5 ≤ H < 3.5 为 III 级, 韧性一般, 表示系统在受到外界影响后, 可以通过自我调节恢复到原始状态; 3.5 ≤ H < 4.5 为 IV 级, 韧性较强, 表示城市在受到内涝影响后可以迅速恢复到原始状态; 4.5 ≤ H ≤ 5.0 为 V 级, 韧性强, 表示城市在受到内涝影响后不仅能最快恢复平衡状态, 还能提升到更高的韧性状态, 即具有自我学习能力和创新能力。

2.3 影响因素确定

为因地制宜制定引导性的发展策略, 将贡献度模型引入计算中, 通过计算单个系统层占系统层总和的比例反映该系统层的贡献程度。利用障碍度模型定量识别基本指标对综合评价结果的影响程度, 即从指标层的角度通过计算单个指标的相对隶属度与参考系中极点 1 之间的距离来表示影响城市内涝韧性水平的大小^[30]。将障碍度超过 10% 的指标视为制约城市内涝韧性的关键限制因素, 介于 5% ~ 10% 的指标视为次要限制因素, 小于 5% 的视为普通限制因素。贡献度模型和障碍度模型具体计算过程见文献[31-32]。

3 结果与分析

3.1 郑州市内涝韧性水平

图 2 为 2001—2020 年郑州市内涝韧性变化。由图 2 可见, 2001—2020 年郑州市内涝韧性初期水平较高, 处于韧性一般的 III 级水平, 但随着“城市

病”逐渐突出, 韧性水平出现先快速下降、再小幅波动的趋势, 由 2001 年的 3.2 下降到 2020 年的 2.9, 年下降率为 1%。2001—2002 年郑州市内涝韧性水平略有上升, 但 2002 年开始快速下降, 2008 年达到最低点, 2013 年左右开始小幅波动。呈现这种变化趋势主要原因是郑州市早期城市化水平和人口数量等因素较低, 环境状况较为良好。但随着经济的快速发展, 自然环境与社会发展间的冲突加剧, 人地矛盾尖锐、排水管网落后等“城市病”逐渐突出, 城市内涝韧性明显降低。2013 年国务院发布《关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知》和 2017 年倡导生态文明建设, 积极改善民生, 保障城市安全。郑州市作为中部地区重要节点, 积极引导城市低影响开发建设模式、持续推动水利信息转型等工作。由于城市建设并非一朝一夕, 具有一定的社会属性, 内涝问题虽有改善但短期内不能马上得到解决, 故 2013 年后郑州市城市内涝韧性水平开始小幅震荡波动, 逐步缓解下降趋势。此外, 因缺乏 2021 年郑州市统计资料, 无法计算 2021 年郑州市内涝韧性水平, 但根据趋势预测, 基本延续 2020 年水平, 内涝韧性水平为 III 级, 但郑州市 2021 年遭受史无前例的特大暴雨后, 城市系统可能需要长时间恢复自身平衡, 这与郑州等洪涝灾后重建规划^[33]的观点一致。

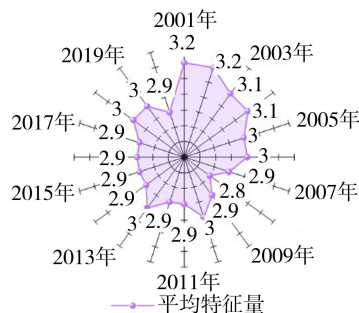


图 2 2001—2020 年郑州市内涝韧性变化
Fig. 2 Changes of waterlogging resilience in Zhengzhou City from 2001 to 2020

3.2 内涝韧性体系中系统层的贡献度

图 3 为 2001—2020 年郑州市内涝韧性系统层 ($B_1 \sim B_3$) 贡献度变化。由图 3 可见, 郑州市内涝韧性系统层中前期抗洪能力 B_1 的贡献度明显高于中期和后期, 其平均贡献度为 41%, 说明内涝前期进行的准备工作一直是郑州市内涝韧性系统的重要环节。而具有排水管网能力、人员脆弱性、医疗救援能力等的中期应对能力 B_2 贡献度最低, 仅为 27%。因此, 促进城市应对内涝能力的提升是未来郑州市内涝韧性建设需要重点考虑的内容。在时间上, 2001—2020 年前期抗洪能力 B_1 呈现波动下降的趋势, 其中 24 h 最大日降水量 C_1 和水利建设规模 C_2 是

系统层中权重较大的指标,可见在城市化进程加快的大背景下,郑州市面临着气候变化加剧和城市水利建设不足的问题,严重制约着灾前管理水平的提升。而中期应对能力 B_2 和后期恢复和适应能力 B_3 的贡献率分别以 5%、3% 的年增长率升高,表明近些年郑州市提升城市应对、控制内涝及政府和公众反思意识的工作逐渐呈现效果,韧性治理理念逐渐运用到管理模式之中。总体来说,郑州市内涝韧性系统中各系统层贡献程度表现为波动态势,未来随着韧性理念的深入,必然会发展到动态平衡的趋势。

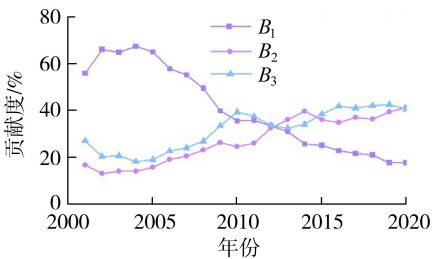


图 3 2001—2020 郑州市内涝韧性系统层贡献度变化
Fig. 3 Changes in contribution of waterlogging resilience system layer in Zhengzhou City from 2001 to 2020

3.3 内涝韧性体系中指标层的障碍度

图 4 为 2001—2020 年郑州市内涝韧性体系各因子障碍度变化。由图 4 可见,排水管网能力 C_9 、政府反思能力 C_{14} 和公众灾后学习能力 C_{15} 是制约发展的关键限制因素,障碍度之和为 35%。其中,排水管网能力 C_9 平均障碍度最高,为 16%,且出现频率为 20 次,说明城市排水管网是 2001—2020 年郑州市内涝韧性建设中最明显的短板。内涝过程中,由于下游管网排水能力不足常常导致管网节点处于超载和溢流状态^[34-35]。未来全球气候变化剧烈,中央政府、各部委近年来明确完善城市雨水管网系统,

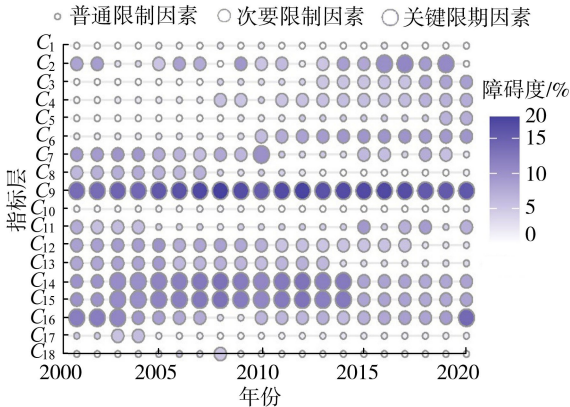


图 4 2001—2020 郑州市内涝韧性体系各因子障碍度变化
Fig. 4 Changes in obstacle degree of each factor in waterlogging resilience system of Zhengzhou City from 2001 to 2020

出台了 GB 55027—2022《城乡排水工程项目规范》《“十四五”城市排水防涝体系建设行动计划》等文件。除此之外,解决城市排水管网问题还应扩大到其他配套措施,加大基础设施建设的投入,转变政府管理部门“重地上,轻地下”的老毛病,发展新式城市排水管网监测控制技术。

图 5 为 2001—2020 年郑州市内涝韧性体系 3 类指标变化情况。由图 5 可见,公共交通服务能力等次要限制因素也是提升郑州市内涝韧性水平不可忽视的部分。次要限制因素主要包括公共交通服务能力 C_{16} 、水利建设规模 C_2 、通信能力 C_7 和水利应急救援能力 C_{12} 等 7 个指标,障碍度之和为 50%。其余为普通限制因素,障碍度之和为 16%,出现频率前两位的指标为水利应急救援能力 C_{12} (17 次) 和公共交通服务能力 C_{16} (14 次)。由此可见,次要限制因素虽单个障碍度小于关键限制因素,但由于其数量多且单个障碍度较大,导致其障碍度之和比关键限制因素高 15%,充分证明次要限制因素在城市建设中同样重要。

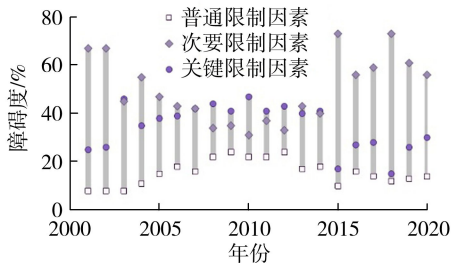


图 5 2001—2020 郑州市内涝韧性体系 3 类因素变化情况
Fig. 5 Changes of three types of factors in waterlogging resilience system in Zhengzhou City from 2001 to 2020

4 讨论

4.1 体系中指标的选择

正确合理地选择指标是城市内涝韧性评估的关键。Angeler 等^[36]认为提高系统中应对某种特定干扰的韧性可能会导致系统在其他方面韧性的变化,但在实际应用中如果不与特定事件相结合,韧性就会变得很宽泛,可能会导致利益相关者无法采取适当的适应措施^[37]。因此,韧性建设需要从全面的角度看待特定干扰的韧性。此外,虽然一些韧性研究考虑了积极因素和消极因素的影响,但洪水灾后最重要的恢复和适应能力尚未得到强调,如 Tayyab 等^[9]的模型由洪水风险、暴露程度、易感程度和应对能力组成,没有考虑恢复能力;黄晶等^[7]的模型只将恢复能力作为响应能力的组成部分。本文构建的城市内涝韧性评估指标体系能够全面反映城市内

涝灾害前、中、后期和城市内部联系。图 6 为考虑内涝周期的城市内涝韧性示意图。由图 6 可见,在城市内涝发生前期,社会经济高速发展,防洪体系、自然消纳面积等准备能力不断完善,目的是尽可能减少未来洪水的负面影响;当暴雨内涝来临之时,城市充分发挥救助市民、避免永久性损害、保障基本服务和资源的能力,最终实现社会各界共同应对灾难;城市从内涝中恢复正常运营以及通过学习和政策升级提高从影响中恢复的能力,以适应或应对未来的洪水。这 3 个系统层中每个阶段指标的选择都应遵循内涝过程的完整性和代表性原则。指标体系中既考虑了真实的气候事件,也考虑了客观的自然社会经济状况,做到了物理、社会和经济三维度兼顾。同时,郑州是一个具有代表性的特大城市,国内许多大城市都具有人口密集、道路发达等特征,因此建立的指标体系具有较好的普适性。

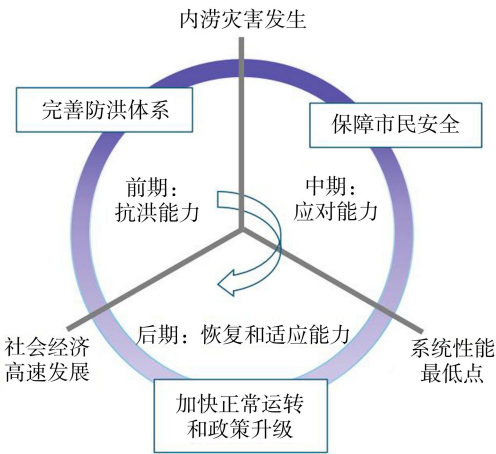


图 6 考虑内涝周期的城市内涝韧性示意图

Fig.6 Schematic diagram of urban waterlogging resilience considering waterlogging cycles

4.2 数学模型的选择

模糊数学在城市内涝韧性评估中分析和求解复杂不确定性方面具有明显优势。评估体系中用于呈现韧性因素的地理、水文和社会经济指标具有多样性、复杂性、不确定性和不准确性,使韧性风险评估成为多原则、多层次的模糊综合评价问题^[11]。不确定性分析的常用方法是人工神经网络和突变理论,这些方法容易理解,但计算过程相对复杂^[38-39]。而模糊数学在面对不确定数据以及高度非线性问题时,计算简单且有效。陈守煜^[19]在传统模糊统计的基础上提出了可变模糊集理论,本文利用可变模糊集结合了模糊概念中的动态可变性,解决指标之间“亦此亦彼”的问题,以等级评价结果反映郑州市内涝韧性水平情况,评价结果具有可靠性。然而可变模糊评估模型以等级评价反映实际状态,虽有统一

的划分标准,但容易出现在不同应用领域中划分等级范围不一致的问题,造成误解,后续仍需进一步研究。

4.3 郑州市内涝韧性提升建议

- a. 城市排水管网是城市灾害发生时应对能力中亟待补齐的短板。2001—2020 年郑州市排水管网情况 C_9 平均障碍度为 16%,且每年均为关键限制因子,表明整个排水体系与城市发展需求不匹配。郑州市主城区管网现阶段设计标准为 5 年一遇^[40],已无法适应郑州市目前的经济发展,未来需设计能够适应当前气候的城市排水管网标准,以应对极端暴雨对特大城市的冲击和影响。城建和水务部门还应及时掌握城市排水管网实时运行状况,寻找管网系统的薄弱环节,并建立健全完善的反馈机制。
- b. 政府反思能力和公众灾后学习能力是利益相关者参与城市内涝韧性提升的关键限制因素。郑州市有关部门和生命线系统负责人未来有责任做好洪水前兆、过程和后果的提前教育和反思,还需要明确区分不同韧性等级的应急响应措施。城市管理部门利用社交媒体平台将洪水记忆和标志物等本地洪水实践经验用于灾后知识宣传,进一步提高社区和公众在灾害发生之后对危险的认知能力。
- c. 公共交通服务能力等次要限制因素也是提高城市内涝韧性水平不可忽视的一部分。未来郑州市各部门决策者应提升公共交通服务能力、水利建设规模、通信能力和水利应急救援能力等次要限制因素,尽可能做到通力合作,共商发展策略,更好地将郑州市发展成为面对内涝冲击时准备充足、应对从容、恢复迅速的水安全韧性城市。

5 结 论

- a. 郑州市 2001—2020 年城市内涝韧性均处于可以通过自我调节恢复到原始状态的韧性一般水平。在时间上,郑州市内涝韧性水平呈现快速下降后小幅波动的趋势,由 2001 年的 3.2 上升到 2020 年的 2.9,年下降率为 1%。
- b. 构建的郑州市内涝韧性评估指标体系系统层中内涝韧性前期的贡献度明显高于中期和后期。城市内涝韧性前期年平均贡献度为 41%,在时间演化上呈现逐年波动下降的趋势,而其他两个系统层均出现升高的趋势,表明韧性治理理念已逐渐运用到管理模式之中。
- c. 排水管网能力、政府反思能力和公众灾后学习能力是制约郑州市内涝韧性水平的关键限制因素,障碍度之和为 35%。其中城市排水管网能力是最主要的关键限制因素,其障碍度最高为 16%,出

现频率为 20 次。

d. 公共交通服务能力等次要限制因素同样是提升郑州市内涝韧性水平的重要部分。次要限制因素和普通限制因素的障碍度之和分别为 50% 和 16%。次要限制因素障碍度之和比关键限制因素高出 15%,表明在未来郑州市内涝韧性建设中除需关注关键限制因素外还要重视次要限制因素。

参考文献:

[1] SIMONOVIC S P, PECK A. Resilience to climate change caused flooding; Metro Vancouver case study [J]. River, 2022, 1 (1): 47-59.

[2] 刘永志,唐雯雯,张文婷,等. 基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (1): 20-27. (LIU Yongzhi, TANG Wenwen, ZHANG Wenting, et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 20-27. (in Chinese))

[3] 张阳,谭良敏,田鸣,等. 基于 PSR 模型的城市生态韧性成长力评价指标体系构建及应用 [J]. 水利经济, 2023, 41 (5): 9-17. (ZHANG Yang, TAN Liangmin, TIAN Ming, et al. Construction and application of evaluation index system of urban ecological resilience growth force based on PSR model [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41 (5): 9-17. (in Chinese))

[4] UNISDR. 2009 UNISDR terminology on disaster risk reduction [EB/OL]. [2023-04-01]. https://www.preventionweb.net/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf.

[5] OLADOKUN V O, MONTZ B E. Towards measuring resilience of flood-prone communities: a conceptual framework [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2019, 19 (6): 1151-1165.

[6] 高玉琴,汪键,高见,等. 基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (2): 22-29. (GAO Yuqin, WANG Jian, GAO Jian, et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (2): 22-29. (in Chinese))

[7] 黄晶,余靖雯,袁晓梅,等. 基于系统动力学的城市洪涝韧性仿真研究:以南京市为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29 (11): 2519-2529. (HUANG Jing, SHE Jingwen, YUAN Xiaomei, et al. Simulation of urban flood resilience based on a system dynamic model: a case study in Nanjing [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29 (11): 2519-2529. (in Chinese))

[8] 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))

[9] TAYYAB M, ZHANG J Q, HUSSAIN M, et al. GIS-Based urban flood resilience assessment using urban flood resilience model: a case study of Peshawar City, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan [J]. Remote Sensing, 2020, 13 (10): 1864.

[10] SUN Tianyu, LIU Deping, LIU Dong, et al. A new method for flood disaster resilience evaluation: a hidden markov model based on Bayesian belief network optimization [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 412: 137372.

[11] 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. (JIANG Weiguo, LI Jing, LI Zhongwu, et al. Fuzzy assessment of the population risk of flood disaster [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35 (9): 84-87. (in Chinese))

[12] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (1): 33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD model in Yingtan City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (1): 33-39. (in Chinese))

[13] 胡彩虹,刘成帅,李想,等. 郑州市雨岛效应多方法集成评估及量化研究 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (2): 152-159. (HU Caihong, LIU Chengshuai, LI Xiang, et al. Multi-method integrated evaluation and quantitative study of rain island effect in Zhengzhou City [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 152-159. (in Chinese))

[14] 新华社. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告公布 [EB/OL]. [2023-04-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/21/content_5669723.htm.

[15] 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))

[16] 刘家宏,裴羽佳,梅超,等. 郑州“7·20”特大暴雨内涝成因及灾害防控 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2023, 44 (2): 38-45. (LIU Jiahong, PEI Yujia, MEI Chao, et al. Waterlogging cause and disaster prevention and control of “7·20” torrential rain in Zhengzhou [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44 (2): 38-45. (in Chinese))

[17] ZHU Shiyao, LI Dezhi, HUANG Guanying, et al. Enhancing urban flood resilience: a holistic framework

- incorporating historic worst flood to Yangtze River Delta, China [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2021,61:102355.
- [18] LI Zongmin,ZHANG Xinxin,MA Yanfang,et al. A multi-criteria decision making method for urban flood resilience evaluation with hybrid uncertainties [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2019,36:101140.
- [19] 陈守煜. 系统模糊决策的可变集理论与应用[M]. 大连:大连理工大学出版社,2017.
- [20] 中国气象报社. 暴雨的定义[EB/OL]. [2023-04-01]. https://www.cma.gov.cn/2011xzt/kpbd/rainstorm/2018050901/201805/t20180509_468007.html.
- [21] 王远坤,夏自强,曹升乐. 水安全综合评价方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(6):618-621. (WANG Yuankun, XIA Ziqiang, CAO Shengle. Comprehensive evaluation method for water security [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35 (6): 618-621. (in Chinese))
- [22] 车生泉,谢长坤. 上海气候变化脆弱性评估与治理对策[J]. 风景园林,2020,27(12):69-74. (CHE Shengquan, XIE Changkun. Vulnerability assessment and countermeasures of climate change governance strategy in Shanghai [J]. Landscape Architecture, 2020, 27 (12): 69-74. (in Chinese))
- [23] 秦趣,杨洪,杨翼. 城市生态基础设施评价指标体系构建及应用;以贵州省六盘水市为例[J]. 热带地理,2015,35(2):235-241. (QIN Qu, YANG Hong, YANG Yi. Construction and application of the evaluation index system of urban ecological infrastructure [J]. Tropical Geography, 2015, 35 (2): 235-241. (in Chinese))
- [24] 赵延德,张慧,陈兴鹏. 城市人居环境质量客观指标评价研究[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(4):1-5. (ZHAO Yande, ZHANG Hui, CHEN Xingpeng. Evaluation of city inhabitable environment quality by objective index system [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23 (4): 1-5. (in Chinese))
- [25] 张有贤,李二强,罗东霞,等. 基于 AHP-熵权法的兰州市水环境安全模糊综合评价[J]. 安全与环境学报,2020,20(2):709-718. (ZHANG Youxian, LI Erqiang, LUO Dongxia, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water environment safety of Lanzhou based on AHP-entropy weight method [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20 (2): 709-718. (in Chinese))
- [26] 马壮林,高阳,胡大伟,等. 城市群绿色交通水平测度与时空演化特征实证研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(7):1236-1250. (MA Zhuanglin, Gao Yang, HU Dawei, et al. Green transportation level measurements and spatial-temporal evolution characteristics of urban agglomeration transportation systems [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2022, 62 (7): 1236-1250. (in Chinese))
- [27] 苏睿先. 基于可持续发展理念的区域产业安全评估:以天津滨海新区为例[J]. 经济地理,2012,32(10):89-94. (SU Ruixian. Evaluation of regional industry security based on sustainable development theory: a case study of Binhai New Area, Tianjin [J]. Economic Geography, 2012, 32 (10): 89-94. (in Chinese))
- [28] 游仙区人力资源和社会保障局. 游仙区失业预测预警和调控应急工作实施方案[EB/OL]. [2023-04-01]. <http://www.youxian.gov.cn/public/8961/24671111.html>.
- [29] 郭文召,刘亚坤,徐向舟,等. 可变模糊识别方法在滑坡稳定性评价中的应用[J]. 农业工程学报,2015,31(8):176-182. (GUO Wenzhao, LIU Yakun, XU Xiangzhou, et al. Application of variable fuzzy pattern recognition method on landslide stability assessment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (8): 176-182. (in Chinese))
- [30] LIU Runqiu, ZHANG Lie, TANG Yudi, et al. Understanding and evaluating the resilience of rural human settlements with a social-ecological system framework: the case of Chongqing Municipality, China [J]. Land Use Policy, 2023, 136, 106966.
- [31] 廖雨辰,谢雨,刘俊雁,等. 九寨沟自然保护区生态安全动态评价及障碍因子[J]. 生态学报,2021,41(15):5950-5960. (LIAO Yuchen, XIE Yu, LIU Junyan, et al. Ecological security dynamic assessment and obstacle factors analysis in Jiuzhaigou National Nature Reserve [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (15): 5950-5960. (in Chinese))
- [32] 王利平,张怡雯,张建云,等. 河南省典型枯水年水资源脆弱性评价及贡献因子识别[J]. 水利水运工程学报,2022(5):1-11. (WANG Liping, ZHANG Yiwen, ZHANG Jianyun, et al. Assessment of water resources vulnerability and identification of its contribution factors in typical dry year in Henan Province [J]. Hydro-Science and Engineering, 2022 (5): 1-11. (in Chinese))
- [33] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 河南郑州等地特大暴雨洪涝灾害灾后恢复重建总体规划[EB/OL]. [2023-04-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220314_1319221.html.
- [34] 耿艳芬,朱保航,钟颖萌. 内涝过程中超载节点水流结构及水头损失分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):52-60. (GENG Yanfen, ZHU Baohang, ZHONG Yingmeng. Analysis of flow structure and head loss at surcharged nodes in surcharging process [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (1): 52-60. (in Chinese))

(下转第91页)

变化对青海湖布哈河流域水文过程的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(2): 208-214. (ZHOU Yifei, CHEN Huiying, ZHANG Shulan, et al. Simulating the influence of climate change on hydrological processes at Buha River Basin of Qinghai Lake by SWIM [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(2): 208-214. (in Chinese))

[41] 何旭, 缪子梅, 田佳西, 等. 基于 CMIP 6 多模式的长江流域气温、降水与径流预估[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(2): 1-8. (HE Xu, MIAO Zimei, TIAN Jiayi, et al. Temperature, precipitation and runoff prediction in the Yangtze River Basin based on CMIP 6 multi-model [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 48(2): 1-8. (in Chinese))

[42] 郭晨煜, 吕海深, 朱永华, 等. WRF-Hydro 模型参数在河西内陆河流域的敏感性分析[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 120-127. (GUO Chenyu, LYU Haishen, ZHU Yonghua, et al. Sensitivity analysis of WRF-Hydro model parameters in Hexi Inland River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 120-127. (in Chinese))

[43] 陈建, 梁川, 陈梁. SWAT 模型的参数灵敏度分析: 以贡嘎山海螺沟不同植被类型流域为例[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 41-45. (CHEN Jian, LIANG Chuan, CHEN Liang. Parameter sensitivity analysis of SWAT model: a case study of small watersheds with different land cover types in Hailuoguo Valley [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 41-45. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-06-27 编辑: 王芳)

+++++

(上接第 55 页)

[35] 傅春, 林国聪, 黄金燕, 等. 基于 MIKE 模型的湘阴县雨水管网健康度评价[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 103-110. (FU Chun, LIN Guocong, HUANG Jinyan, et al. Health degree evaluation of rainwater pipe network in Xiangyin County based on MIKE model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 103-110. (in Chinese))

[36] ANGELER D G, ALLEN C R. Quantifying resilience[J]. Journal of Applied Ecology, 2016, 53(3): 617-624.

[37] YU Shuying, KONG Xuesong, WANG Qi, et al. A new approach of robustness-resistance-recovery (3Rs) to assessing flood resilience: a case study in dongting lake basin [J]. Landscape and Urban Planning, 2023, 230: 104605.

[38] 刘媛媛, 刘业森, 郑敬伟, 等. BP 神经网络和数值模型相结合的城市内涝预测方法研究[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 284-295. (LIU Yuanyuan, LIU Yesen, ZHENG Jingwei, et al. Intelligent rapid prediction method of urban flooding based on BP neural network and numerical simulation model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 284-295. (in Chinese))

[39] HE Guanjie, CHAI Junrui, QIN Yuan, et al. Coupled model of variable fuzzy sets and the analytic hierarchy process and its application to the social and environmental impact evaluation of dam breaks [J]. Water Resources Management, 2020, 34(9): 2677-2697.

[40] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22. (WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 17-22. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-09-09 编辑: 王芳)

+++++

• 简讯 •

《水资源保护》入选江苏科技期刊卓越行动计划领军期刊

2024 年 6 月, 江苏省科学技术协会公布了 2024 年江苏科技期刊卓越行动计划入选项目, 《水资源保护》入选首批江苏科技期刊卓越行动计划领军期刊。

江苏科技期刊卓越行动计划是江苏省科协深入贯彻中国科协、中宣部、教育部、科技部《关于深化改革培育世界一流科技期刊的意见》, 认真落实江苏省科协、江苏省委宣传部、江苏省教育厅、江苏省科技厅《关于推进一流科技期刊高水平建设的实施意见》(苏科协发[2024]26 号), 加快推动江苏省科技期刊高质量发展, 组织实施的一项科技行动计划。江苏科技期刊卓越行动计划重点在新兴交叉、战略前沿、共性基础技术领域抢占前沿科技制高点, 培育打造世界一流科技期刊, 服务高水平基础研究、应用研究和产业发展。江苏科技期刊卓越行动计划设置建设领军期刊和培育扶持高起点新刊 2 类项目, 其中, 领军期刊遴选对标国际领先期刊, 明确建设目标, 精准支持, 推动江苏科技期刊跻身国内、国际一流科技期刊行列, 示范引领带动全省科技期刊高水平发展。

(本刊编辑部供稿)

• 91 •