

# 基于多元发展情景的黄河流域 城市安全韧性仿真研究

任捷,王迪,王雅荣,刘颖

(内蒙古科技大学 经济与管理学院;内蒙古自治区高等学校人文社会科学重点研究基地产业信息化与产业创新研究中心;内蒙古哲学社会科学重点研究基地黄河“几字弯”发展研究中心,内蒙古 包头 014010)

**摘要:**以地理环境多样和生态脆弱著称的黄河流域城市,在诸多因素的影响下,所面临的风险灾害表现出了破坏程度大和治理难等特点.选择安全韧性作为城市治理新思路的突破口,从灾害抵抗力、适应力和恢复力维度构建城市安全韧性仿真模型,以黄河流域64个城市为研究对象,分析2010年至2018年城市安全韧性及抵抗力、适应力和恢复力变化原因,设定多元发展情景并模拟2019至2030年城市安全韧性的动态变化.结果表明:黄河流域城市安全韧性仿真模型能够用于分析与预测城市安全韧性变化;黄河流域灾害抵抗能力指数与灾害恢复能力指数在仿真期出现两次波动.根据《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,黄河流域城市安全韧性将不断提升,且优于现状延续发展情景,建议黄河流域城市系统从监测预报预警体系、外部协同救援能力、产业结构、人口总量、生态环境建设和安全管理投入方面提升黄河流域城市安全韧性水平,为黄河流域城市安全韧性水平提升提供理论参考与决策依据.

**关键词:**黄河流域;城市安全韧性;多元情景;仿真预测

**中图分类号:**X923

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-2367(2025)02-0024-12

黄河流域人口和经济密度大<sup>[1]</sup>,给城市基础设施、社会服务和居住环境带来挑战;流域内特殊的地理环境和气候条件是造成水土流失加剧、水旱灾害频发等一系列生态环境问题的关键因素<sup>[2]</sup>.黄河流域城市系统所展示出的“复杂”同自然环境的叠加、交互,使得风险趋势进一步增加,现有风险治理模式同防灾减灾需要不相适宜,导致黄河流域城市系统中的物理空间、经济载体与社会场域等要素关系复杂且难以预测、呈非线性演化<sup>[3-4]</sup>.如何应对黄河流域城市系统面临的不确定性事件,降低常态化的风险脆弱性,提升非常态的风险韧性,成为理解黄河流域城市安全治理和韧性改进的关键思路<sup>[5]</sup>.韧性强调系统应对变化与稳定自身的能力<sup>[6]</sup>,即在灾害抵抗、吸收、适应及恢复过程中,形成维持能力、恢复能力、适应变化以及快速转型能力<sup>[7]</sup>.在城市安全韧性系统中,安全是对城市空间属性的一种界定<sup>[8]</sup>,强调城市对安全问题的应对、安全环境的评估以及安全状态的维持.因此,黄河流域城市安全韧性仿真评估是识别和衡量城市薄弱环节和应灾能力的重要方法和手段.

**收稿日期:**2023-11-07;**修回日期:**2024-09-30.

**基金项目:**国家自然科学基金(72404153);内蒙古自治区高等学校人文社会科学重点研究基地开放课题(KFSM-KDSK0208);内蒙古自治区社会科学基金(2024EY22);内蒙古自治区直属高校基本科研业务项目(2024QNJS154).

**作者简介:**任捷(1986—),女,内蒙古包头人,内蒙古科技大学副教授,博士,研究方向为城市韧性与应急治理,E-mail:renjiezgga@163.com.

**通信作者:**王迪(1995—),男,山西临汾人,硕士研究生,研究方向为城市韧性与应急治理,E-mail:374540109@qq.com.

**引用本文:**任捷,王迪,王雅荣,等.基于多元发展情景的黄河流域城市安全韧性仿真研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(2):24-35.(Ren Jie, Wang Di, Wang Yarong, et al. Simulation study on urban safety resilience in the Yellow River Basin based on multiple development scenarios[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2025, 53(2): 24-35. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.11.07.0001.)

目前,国内外众多学者主要从以下3个方面对城市安全韧性展开研究:一是对城市安全韧性的内涵探讨,如罗通元<sup>[9]</sup>从安全韧性的内容、内涵和特点3个方面阐述了安全韧性的基本概念,MEEROW等<sup>[10]</sup>将城市安全韧性定位为城市系统维持期望功能或迅速恢复的能力,以及适应变化的快速转型能力。二是以社会-生态系统(social ecological systems, SESs)<sup>[11]</sup>与复杂适应系统(complex adaptive systems, CAS)理论<sup>[12]</sup>等系统内在演化理论为基础的城市安全韧性评价体系与框架构建,如黄弘等<sup>[13]</sup>从城市设施、人员、管理安全韧性构建安全韧性城市评价指标体系;高禄等<sup>[14]</sup>评估呼和浩特市街道的安全韧性;郭羽羽等<sup>[15]</sup>运用从抵抗力、恢复力、适应力3个方面构建城市安全韧性指标体系,运用熵权-正态云模型评估西安市城市安全韧性;朱正威等<sup>[16]</sup>从结构之维、功能之维与保障之维构建城市安全韧性评价框架。三是运用系统动力学对于城市区域安全韧性的仿真研究,如方东平等<sup>[17]</sup>动态评估地震发生时社区的安全韧性。

从已有研究来看,当前对于城市安全韧性研究大多为理论探讨与指标体系构建与评价,且研究大多是对安全韧性的静态评估,或拘泥于单一城市研究,或进行韧性时空的评价,鲜少有定量分析城市安全韧性的要素间相互反馈性、作用机制,缺乏城市风险与结构性因素间的复杂关系探究,而动态评估缺乏对于城市整体安全韧性的测度,对于黄河流域城市而言,大多从城市<sup>[18]</sup>、经济<sup>[19]</sup>、生态<sup>[20]</sup>、旅游<sup>[21]</sup>、工业韧性<sup>[22]</sup>等构建评价体系,少有对于城市安全韧性的研究。然而,从当前国家安全治理体系和能力现代化的建设需要来看,有效的城市安全韧性预测对区域城市防灾减灾具有重要意义,但目前对于黄河流域城市的研究较少,需要在城市安全韧性的体系建设、韧性发展情景、韧性演化预测开展研究。

系统动力学(system dynamics,简称SD)是一种理论和数学建模技术,旨在分析、理解并讨论复杂问题分析各种系统的行为<sup>[23]</sup>。系统动力学方法能够有效反映整个系统结构以及各要素之间的反馈关系,并能够进行仿真预测。本文为定量揭示应灾时城市子系统各要素间的交互关系,预测不同情景下城市安全韧性,构建城市安全韧性评价指标体系,以灾害抵抗能力、恢复能力、适应能力3个核心维度和城市子系统构成城市安全系统,运用系统动力学方法构建城市安全韧性仿真模型。以黄河流域64个城市为研究对象,根据系统动力学的信息反馈性特征、黄河流域发展规划和城市安全政策选择设置了现状延续型、经济优先型、规划发展型、韧性建设型4种发展情景,分析黄河流域城市安全韧性在不同发展情景下的水平,为黄河流域城市安全韧性治理提供决策依据。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 区域概况

黄河流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等9个省区,流域内地形起伏较大,地貌西高东低,季节差别大、湿度小,蒸发大,地形与温、湿度的相互作用导致降水时空分布不均匀,使得域内灾害分布广、类型多、突发性强,灾害往往链生成链、致灾后果严重。该流域的灾害主要类型包括:洪涝灾害、水土流失、旱灾以及干支流水体污染等<sup>[24]</sup>,黄河流域城市系统面临多灾害风险挑战,亟待提升城市系统安全韧性抵御来自复合灾害的压力。

近年来,黄河流域内的防灾减灾工作受到党和国家的高度重视。2019年,“黄河流域生态保护和高质量发展”上升为国家重大战略。2021年,《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》中提出“强化灾害应对体系和能力建设是增强城市安全韧性的题中之义”。2022年,《中华人民共和国黄河保护法》总则中指出,加强黄河流域自然灾害的预防与应急准备、监测与预警。同年,《黄河流域生态保护和高质量发展科技创新实施方案》将主要目标聚焦于“流域生态系统耦合演变规律”、“水旱灾害监测预警与防控”等方面取得理论与技术突破。上述法律、规划和政策方案的出台,充分说明黄河流域提升城市安全韧性以应对灾害的重要性,也对黄河流域城市安全韧性建设提出了新要求。

### 1.2 研究对象与数据来源

本文以黄河流域所涵盖9省区的城市为研究对象,共76个城市,考虑数据的连续性、完整性和可获取性,剔除阿坝藏族羌族自治州、阿拉善盟、甘南藏族自治州、甘孜藏族自治州、果洛藏族自治州、海北藏族自治州、海南藏族自治州、海西蒙古族藏族自治州、黄南藏族自治州、临夏回族自治州、玉树藏族自治州、济源市12个

区市, 剩余 64 个城市(表 1)作为研究对象. 研究使用的数据来自 2010 年至 2020 年间的中国统计年鉴、中国城市统计年鉴、中国财政统计年鉴、中国城乡规划统计年鉴、中国环境统计年鉴以及政府各部门公开报告.

表 1 研究城市

Tab. 1 Research cities

省区	城市	数量
内蒙古自治区	巴彦淖尔市、包头市、鄂尔多斯市、呼和浩特市、乌海市、乌兰察布市	6
宁夏回族自治区	固原市、石嘴山市、吴忠市、银川市、中卫市	5
山东省	滨州市、德州市、东营市、菏泽市、济南市、济宁市、聊城市、临沂市、泰安市、淄博市	10
山西省	大同市、晋城市、晋中市、临汾市、吕梁市、朔州市、太原市、忻州市、阳泉市、运城市、长治市	11
河南省	安阳市、鹤壁市、焦作市、开封市、洛阳市、南阳市、平顶山市、濮阳市、三门峡市、新乡市、郑州市	11
甘肃省	白银市、定西市、兰州市、陇南市、平凉市、庆阳市、天水市、武威市、张掖市	9
陕西省	安康市、宝鸡市、汉中市、商洛市、铜川市、渭南市、西安市、咸阳市、延安市、榆林市	10
青海省	海东市、西宁市	2
合计		64

## 2 研究方法 with 模型构建

### 2.1 评估方法

本文依据《中华人民共和国城乡规划法》《中华人民共和国突发事件应对法》《中华人民共和国防震减灾法》等法律法规, 参照 GB/T 51327—2018《城市综合防灾规划标准》和 GB/T 40947—2021《安全韧性城市评价指南》现行执行标准, 根据廖惠全等<sup>[25]</sup>、王光辉等<sup>[26]</sup>、SHI 等<sup>[27]</sup>多位学者提出的城市韧性评估框架和评价体系, 构建黄河流域城市安全韧性评估指标体系, 见附录表 S1.

根据熵权法计算指标权重. 本文综合考虑灾害抵抗能力( $B$ )、灾害恢复能力( $R$ )、灾害适应能力( $A$ )对城市安全韧性指数(urban safe resilience,  $USR$ )的影响程度, 构建了城市安全韧性评估模型, 如式(1).

$$USR = B + R + A = \sum_{i=1}^n (\omega_i \bar{x}_i), \quad (1)$$

式中,  $\omega_i$  为指标权重,  $\bar{x}_i$  为标准化指标;  $n$  为指标数. 灾害抵抗能力( $B$ )、灾害恢复能力( $R$ )、灾害适应能力( $A$ )对城市安全韧性指数具有正相关作用, 即  $B$ 、 $R$ 、 $A$  指数越大, 城市安全韧性指数越大.

### 2.2 基于系统动力学的黄河流域城市安全韧性仿真模型

#### 2.2.1 建模目的

基于系统动力学的理论和方法, 构建城市安全韧性的因果循环图和系统动力学流图. 通过仿真计算, 定量描述与城市安全韧性相关的各个因素间的反馈和因果关系. 评估现有黄河流域城市安全韧性的水平, 预测其未来发展趋势.

#### 2.2.2 系统边界

模型的空间界限定为黄河流域范围内的 64 个城市, 将 2013 年国务院批复的《黄河流域综合规划(2012—2030 年)》作为分期依据, 设定时间边界为 2010—2030 年, 仿真基期年为 2010 年, 2010—2018 年为历史仿真时间段; 由于 2019 年“黄河流域生态保护和高质量发展”上升为国家重大战略, 因此模拟基期年为 2019 年, 设定 2019—2030 年为模拟预测时间段. 从已有研究来看, 城市安全韧性是指城市自身能够有效应对来自经济社会、技术系统和基础设施的冲击, 能够在灾后迅速恢复、进行适应性调整、可持续发展的能力<sup>[28]</sup>. 城市安全韧性指标边界和系统边界围绕城市安全韧性的概念和内涵进行设置, 设定系统边界为城市经济系统、服务系统和生命线系统, 指标边界结合孟晓静等<sup>[29]</sup>学者构建的城市应灾指标体系设定为灾害抵抗能力、灾害适应能力和灾害恢复能力.

#### 2.2.3 系统结构分析

城市安全韧性是城市复杂巨系统应对灾害的能力, 图 1 为构建的城市安全韧性系统. 但城市安全韧性不局限于灾害应对, 还包括经济、社会、文化、空间、环境等多个维度韧性发展的引导策略, 以及城市系统的适应

能力、冗余性等功能属性的完善<sup>[30]</sup>.城市经济系统作为城市可持续发展的核心,在面临灾害时,会受到生命线系统的中断和服务系统的受损而受到负面冲击.城市生命线系统是城市正常运行的必要组成部分.在灾害发生前后,生命线系统的灾害抵抗能力和恢复能力对于城市经济系统的稳定性至关重要.城市服务系统直接保障城市居民的基本需求和社会稳定.

在系统结构分析基础上,利用 Vensim 软件绘制系统因果图,如图 2 所示.城市安全韧性是从灾害抵抗能力、灾害适应能力和灾害恢复能力 3 方面进行综合评估.

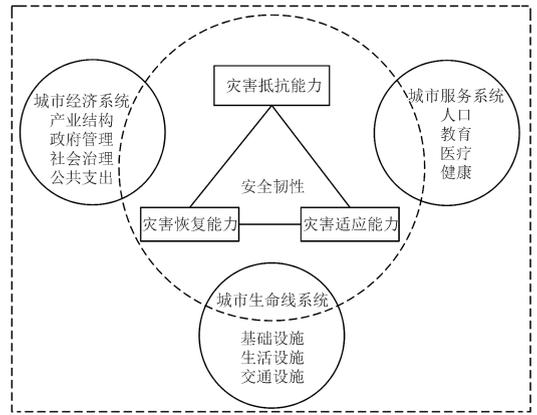


图1 城市安全韧性系统

Fig.1 Urban safety resilience system diagram

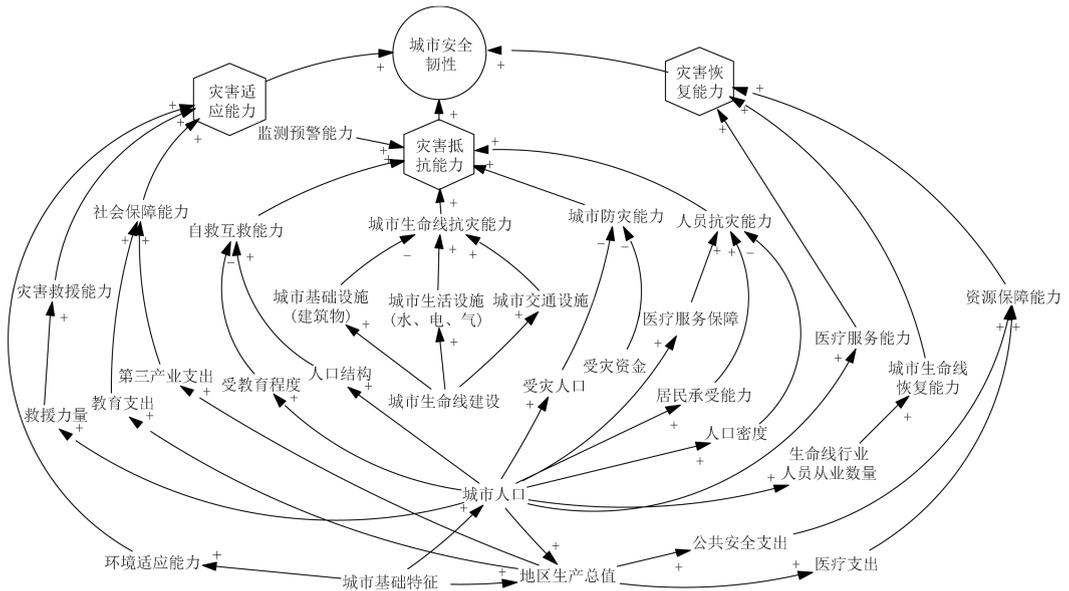


图2 城市安全韧性系统因果图

Fig.2 Causal diagram of urban safety resilience system

### 2.3 模型构建与参数确定

在系统结构分析的基础上对灾害抵抗、恢复和适应 3 个子系统的因果反馈关系进行研究,详细分析城市不同子系统的因素交互,结合研究区实际状况及城市安全韧性引入水平变量、辅助变量,构建黄河流域城市安全韧性模型(图 3),形成要素间循环反馈机制.以图 3 中“GDP”所涉及的影响要素为例,分析该系统中的其中一条关系链:提高 GDP 的增量,增加安全支出和医疗支出,提升资源保障能力,最终提升灾害恢复能力.

### 2.4 模型检验与敏感性分析方法

#### 2.4.1 模型检验方法

模型的检验就是验证系统模型的运行精度,对比模型仿真结果与历史数据,验证模型精度,如模型精度不高则分析误差来源,修正模型变量设置,从而使得模型贴合实际情况.误差计算方法如式(2).

$$\delta = \frac{x'_i - x_i}{x_i}, \quad (2)$$

式中,  $\delta$  为相对误差,  $x_i$  为历史数据,  $x'_i$  为模型运行结果.

#### 2.4.2 敏感性分析方法

敏感性分析方法即改变模型中的部分参数或模型结构,分析模型中变量对模型运行的影响.具体分析方法为改变模型中某一因素的值,其他因素保持不变,将修改后的模型运行结果与修改前进行对比,差距越大

说明该因素的敏感性越高。

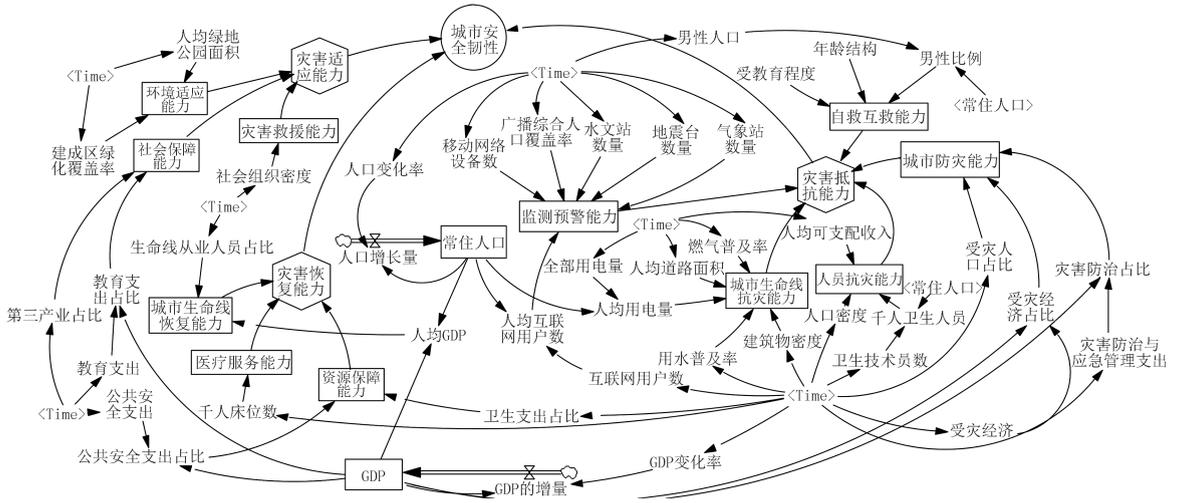


图3 城市安全韧性系统动力学模型流程图

Fig. 3 Flow diagram of the dynamic model of urban safety resilience system

### 3 模型检验与模拟结果

#### 3.1 模型检验结果

##### 3.1.1 模型检验

研究模型检验 2010—2018 年时间段的历史数据.一般系统动力学模型的误差在 15% 以下视为合理,误差在 10% 以下说明模型能够较好反应实际情况<sup>[31]</sup>.本文选择模型中“GDP”、“城市常住人口”进行历史数据检验.根据表 2 的检验结果显示,除 2011 年和 2012 年实际 GDP 与预测值有一定偏差,误差超出 10%,其余均在 10% 以内,说明模型仿真结果符合实际.因此,本文构建的城市安全韧性仿真模型能够真实、准确反映现实系统的定量关系.

表 2 模型检验相对误差

Tab. 2 Relative error of model testing

年份	GDP 仿真值	实际值	误差	人口仿真值	实际值	误差
2010	11 258 423	12 046 812	-6.541%	363.580	360.580	0.829%
2011	11 858 500	13 372 754	-12.772%	367.764	365.793	0.533%
2012	13 439 200	14 908 589	-10.932%	370.236	367.317	0.791%
2013	15 042 500	16 212 535	-7.782%	372.079	368.763	0.892%
2014	16 449 000	17 266 014	-4.972%	375.019	369.708	1.423%
2015	17 834 000	17 885 343	-0.292%	378.488	371.105	1.953%
2016	19 103 800	19 043 015	0.324%	380.940	372.614	2.194%
2017	20 483 100	20 609 047	-0.613%	384.076	374.075	2.599%
2018	21 757 100	22 020 103	-1.212%	385.485	375.708	2.543%

##### 3.1.2 参数敏感性分析

本研究进行敏感性分析时为增加指标间的可比性,每个指标提高 50%,计算 30 个指标提高 50% 后城市安全韧性指数的变化,以 2018 年城市安全韧性指数为例,模型运行结果见表 3.通过各指标的敏感度排序,确定敏感度排序靠前的 8 个指标:GDP 增量、地震台数量、水文站数量、公共安全支出、建成区绿化覆盖率、第三产业占地区生产总值比例、社会组织密度、灾害防治及应急管理支出.

#### 3.2 黄河流域城市安全韧性仿真结果

根据建立的城市安全韧性综合评价模型,计算黄河流域城市 2010—2018 年的城市安全韧性、灾害抵抗能力、灾害恢复能力、灾害适应能力指数,具体计算结果见图 4~图 7.

(1)灾害抵抗能力.2010—2018 年黄河流域城市灾害抵抗能力指数由 0.462 增长至 0.715,2011—2012 年呈现激增趋势,该趋势变化原因在于 2011 年黄河水文基本建设项目管理系统投入运行,水文站数量达 97 个,气象站数量 1 165 个,加强了水文和气象应急测报能力,监测预警能力增强.2012 年后增势变缓,该趋势变化原因在于 2012 年以来,黄河流域人口平均增长率为 0.73%,同比增长 0.2%,城镇化率从 2012 年的

52.57%至 2018 年的 58.65%，人口增长和城市化进程加快，在此趋势下，建筑物密度和人口密度呈现激增趋势，人员脆弱性和建筑物脆弱性增加，在洪涝与地震灾害等自然灾害的外部影响下，黄河流域年均受灾资金达 946 526 万元，占 GDP 的 0.46%，而灾害应急管理支出占比为 0.15%，城市防灾能力较弱。此外，在灾害来临时，代表人员抗灾能力的指标千人卫生技术人员数年均增速为 0.58%，人员抗灾能力不足，以上分析表明城市防灾能力与人员抗灾能力与高速发展不匹配，故在 2012 年后灾害抵抗能力指数增速变缓。

表 3 参数敏感性分析结果

Tab. 3 Sensitivity analysis results of indicators

参数	措施	数值	增长幅度	参数	措施	数值	增长幅度
USR	维持现状	0.792	0.000%	GDP 增量	增加 50%	0.832	5.301%
$x_{15}$	增加 50%	0.792	0.000%	$x_{14}$	增加 50%	0.808	2.032%
$x_{16}$	增加 50%	0.792	0.000%	$x_{23}$	增加 50%	0.808	2.026%
$x_{12}$	增加 50%	0.792	0.000%	$x_{30}$	增加 50%	0.809	2.052%
$x_{20}$	增加 50%	0.792	0.000%	$x_4$	增加 50%	0.809	2.081%
$x_{17}$	增加 50%	0.797	0.713%	$x_{24}$	增加 50%	0.809	2.103%
$x_7$	增加 50%	0.798	0.812%	$x_{13}$	增加 50%	0.809	2.111%
$x_2$	增加 50%	0.802	1.293%	$x_{11}$	增加 50%	0.809	2.152%
$x_{22}$	增加 50%	0.802	1.321%	$x_5$	增加 50%	0.809	2.153%
$x_{27}$	增加 50%	0.805	1.602%	$x_3$	增加 50%	0.809	2.154%
$x_{19}$	增加 50%	0.807	1.912%	$x_1$	增加 50%	0.809	2.162%
$x_{21}$	增加 50%	0.808	2.023%	$x_{18}$	增加 50%	0.813	2.181%
$x_6$	增加 50%	0.808	2.021%	$x_{28}$	增加 50%	0.812	2.183%
$x_9$	增加 50%	0.808	2.034%	$x_{25}$	增加 50%	0.809	2.192%
$x_{10}$	增加 50%	0.808	2.033%	$x_{29}$	增加 50%	0.814	2.281%
$x_8$	增加 50%	0.808	2.032%	$x_{26}$	增加 50%	0.811	2.352%

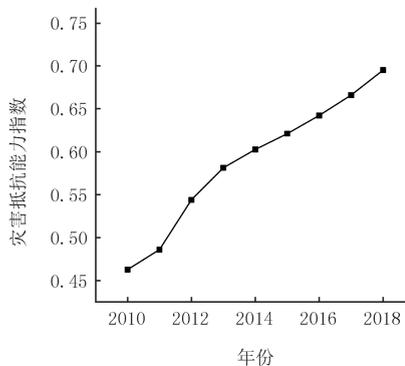


图4 2010-2018年灾害抵抗能力指数

Fig. 4 Disaster resistance index from 2010 to 2018

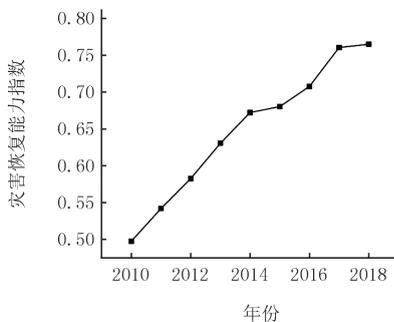


图5 2010-2018年灾害恢复能力指数

Fig. 5 Disaster recovery capability index from 2010 to 2018

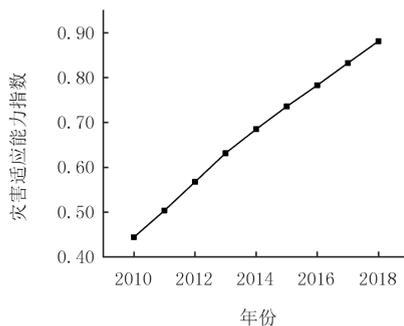


图6 2010-2018年灾害适应能力指数

Fig. 6 Disaster adaptability index from 2010 to 2018

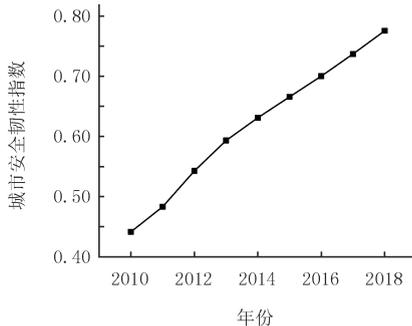


图7 2010-2018年城市安全韧性指数

Fig. 7 Urban safety resilience index from 2010 to 2018

(2)灾害恢复能力.2010—2018 年黄河流域城市灾害恢复能力指数由 0.497 增长至 0.765,2014 年出现较大波动,该趋势原因在于 2014 年黄河干流来水较常年同期减少近 20%,造成多地干旱,受灾人口达 3 450 万人,受灾损失达 70 亿元,城市紧急制订引黄应急抗旱方案,代表资源保障能力的指标公共安全支出达 196.92 亿元,在资金支持下城市灾害抵抗能力缓慢恢复.2017 年增势变缓,该趋势原因在于 2017 年为极端暴雨年<sup>[32]</sup>,黄河流域发生多次暴雨,城市生命线从业人员占比为 1.83%,同比减少 1.6%,城市生命线恢复能力较弱,代表医疗救助能力的指标千人病床数在近年几乎未变化,在发生极端暴雨下医疗服务能力不足,无法迅速恢复到灾前状态,故 2017 年增势较为平缓.

(3)灾害适应能力.2010—2018 年黄河流域城市灾害适应能力指数由 0.446 增长至 0.885,增幅达 98.5%.该增幅的原因在于 2010 年,黄河流域 64 个城市约有 11 万个应急救援社会组织,截至 2019 年底,社会组织数量已达 20 万个,社会组织密度增加,灾害救援能力增强;第三产业占比由 34.62%激增至 45.61%,科技创新运用在灾害监测救援发展技术,社会保障能力提升;代表环境适应能力的指标人均公园绿地面积增幅达 20%,建成区绿化覆盖率由 35.79%增至 39.69%,表明黄河流域城市发展途中注重生态环境保护,城市系统的适应能力指数稳步增长.

(4)城市安全韧性.2010—2018 年,黄河流域城市安全韧性指数由 0.449 增长至 0.783,增幅达 75.7%.该趋势原因在于黄河流域城市系统的灾害抵抗力、恢复力、适应力均呈持续上升趋势,总体导致城市安全韧性稳步上升.其发展趋势也符合《黄河流域综合规划(2012—2030 年)》的基本要求,黄河流域城市安全韧性在不断优化中,城市抵抗、恢复、适应灾害的响应能力在不断增强.

### 3.3 多元情景下黄河流域城市安全韧性预测结果

#### 3.3.1 发展情景设定

在对“十四五”国家应急体系规划、黄河流域各省国土空间规划和“十四五”规划、基础设施建设规划与相关防灾减灾规划基础上,结合统计期内的数据测算规律,本文依据 3.1 节中确定的 8 个指标,相互组合设定 4 种发展方案,如表 4 所示.4 种方案分别为现状延续型、经济优先型、规划发展型和韧性建设型表.模拟 4 种发展情景下 2019 年至 2030 年的黄河流域城市安全韧性发展趋势.

表 4 仿真情境指标取值设置

Tab. 4 Setting of simulation scenario indicator values

控制变量	现状延续型	经济优先型	规划发展型	韧性建设型
GDP 增长率	保持不变	13.99%	保持不变	6.15%
第三产业比例	保持不变	45.65%	保持不变	43.25%
地震台数量增长率	保持不变	保持不变	4.98%	4.98%
水文站数量增长率	保持不变	保持不变	2.32%	2.32%
公共安全支出增长率	保持不变	保持不变	6.40%	7.25%
建成区绿化覆盖率	保持不变	保持不变	保持不变	50.00%
社会组织数量比例	保持不变	保持不变	保持不变	80.00%
灾害防治与应急管理支出增长率	保持不变	保持不变	16.96%	18.00%

现状延续型发展情景即假定黄河流域城市未来按照现有发展模式发展,参数设置依据 2010—2018 年历史发展规律.

经济优先型发展情景中优先考虑城市经济发展,人口集聚促进经济发展,参考已有文献[21, 33],设定 GDP 增长率、第三产业占地区生产总值比例与城市常住人口增长率为 2010 年至 2018 年最大值,模型中其他参数保持不变.

规划发展型发展情景依据《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》提出的“以提升黄河流域强化灾害应对体系、有效提升防洪能力建设和提高重大公共卫生事件应对能力”等要求,设定为以提高城市防灾能力、监测预警能力和资源保障能力为导向的发展方案,水文站数量与地震台数量参考各省国土空间规划、“十四五”防震减灾规划、全国水文基础设施建设“十四五”规划、“十四五”黄河流域生态保护和高质量发展气象保障规划等,经计算后设定;公共安全支出和灾害防治及应急管理支出增长率参考 2023 年全国一般公共预

算支出中上述两项指标的同比增长率设定,模型中其他参数保持不变。

韧性建设型发展情景下综合考虑城市灾害抵抗力、适应力和恢复力多方面共同发展,GDP增量和常住人口增量与第三产业比例参考黄河流域9省“十四五”规划均值设定,此外地震台数量和水文站数量参照规划发展情景中设定,社会组织数量参照“十四五”社会组织发展规划中要求社会组织占全部社会组织比例超过80%设定,灾害防治及应急管理支出和公共安全支出参考“十四五”国家应急体系规划与2023年全国一般公共预算支出经计算后设定,建成区绿化覆盖率参考韧性城市雄安新区<sup>①</sup>规划设定。

### 3.3.2 黄河流域城市安全韧性预测结果

将不同情景的指标数值分别代入系统动力学模型中运行,得出各评价指标在2019—2030年不同发展情景下的值,根据上文建立的城市安全韧性评估模型,测算出黄河流域城市2019—2030年的不同发展情景下的城市安全韧性。

从图8可得,韧性建设型情景下的黄河流域城市安全韧性最高,其次分别是规划发展型、经济优先型,现状延续型发展情景下的城市安全韧性最低。4种发展情景下,城市安全韧性均呈上升趋势。

现状延续型情景下黄河流域城市表现出较低的安全韧性水平。这一情境下,城市长期以来一直保持相对稳定的政策和规划,未能积极采取行动来应对潜在的灾害和环境问题。城市基础设施可能存在老化问题,社会韧性较低,缺乏社会组织支持。

经济优先型情景下经济为先的发展理念导致重视经济增长而忽略了其他方面的发展需求,资源向区域经济增长倾斜,而基础设施建设、防灾减灾和灾害的监控预防等方面的支出相对较少,同时高速增长的人口和经济增长带来环境压力、资源紧张问题,城市安全韧性建设滞后,故整体城市安全韧性水平与现状延续型高度重合。

规划发展型情景下,2019年至2021年期间,黄河流域城市的安全韧性发展较为缓慢,在2021年,黄河流域城市的韧性发展速度显著提升是由于《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》发布所推动。在2022年,随着《中华人民共和国黄河保护法》的颁布和《黄河流域生态保护和高质量发展科技创新实施方案》的实施,城市安全韧性的增长速度进一步加快。在此情景中,水文站与地震台数量增多,公共安全资金与灾害应急管理资金投入黄河流域城市灾害监测预警体系与防灾减灾建设,监测预警能力与城市防灾能力增强。以上表明规划发展型城市在城市防灾减灾方面具有较高的专业性,有利于提高城市抵御灾害的能力。

韧性建设型情境下,黄河流域城市安全韧性上升幅度最大,增幅达到74.3%。在此情境下城市经济增长同时关注经济结构的多样性,此外,城市在地震台数量、水文站数量、公共安全支出、灾害防治与应急管理支出方面均有显著投入,城市的抗灾和应急响应能力增强。社会组织数量的增多提升应急救援速度,建成区绿化覆盖率的增加有助于提高城市生态韧性。韧性建设情景中政府采取多层次、多方面的策略,综合考虑经济、社会和环境因素以提高城市安全韧性水平。

## 4 结论与建议

综合以上研究,本文得出以下结论:

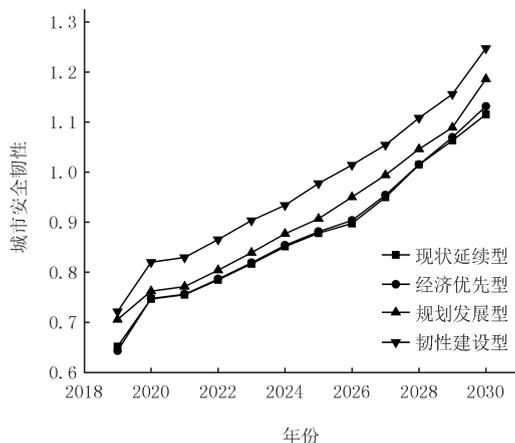


图8 不同发展情景下黄河流域城市安全韧性指数

Fig.8 Urban safety resilience index in the Yellow River Basin under different development scenarios

<sup>①</sup> 目前在北京、上海、成都、雄安新区等韧性城市中,只有雄安新区规划中有建成区绿化覆盖率指标,同时因为雄安新区发展与黄河流域城市发展较为相似,故选取其为设定标准。

(1)城市安全韧性是城市复杂系统应对灾害的能力,而城市系统中各要素存在复杂的交互关系,系统动力学模型的运行结果表明,运用该模型预测黄河流域城市安全韧性以及进行不同发展情景下的政策模拟可行。

(2)黄河流域城市安全指数在2010年至2018年仿真期内安全韧性稳步上升,但灾害抵抗能力、恢复能力出现数次明显变化。灾害抵抗能力指数2011年激增原因在于黄河水文基本建设项目管理系统投入运行,水文站数量增多,监测预警能力增强。2012年后增速变缓城市防灾能力与人员抗灾能力与高速发展不匹配。灾害恢复能力指数2014年出现较大波动原因在于黄河流域多地干旱,受灾人口众多。2017年增速较为平缓原因在于城市生命线从业人员较少,医疗救助能力不足。灾害适应能力稳步上升原因在于救援组织密度、第三产业占比、绿化覆盖率等增多。

(3)参数敏感性分析结果表明GDP增量、地震台数量、水文站数量、公共安全支出、建成区绿化覆盖率、第三产业占地区生产总值比例、社会组织密度、灾害防治及应急管理支出对黄河流域城市安全韧性影响结果显著。

(4)黄河流域城市安全韧性在2019年至2030年预测期内规划发展型策略下呈现稳步提升的趋势,其水平明显超越了现状延续型策略。然而,与韧性建设型策略相比,仍存在一定的改进潜力。故为了实现黄河流域城市安全治理能力提升,应选择韧性建设型,加强水文站与地震台数量建设提升监测预警能力,加强公共安全资金与灾害应急管理资金投入黄河流域城市灾害监测预警体系与防灾减灾建设,提升第三产业比例与建成区绿化覆盖率。

基于以上分析,提出以下建议,以推动黄河流域城市安全韧性提升:

(1)完善监测预报预警体系。针对黄河流域太阳辐射强、温差较大、降雨不均,黄河中上游地区沙暴和扬沙较多等气候特征,加强黄河流域现有水文站与地震观测站网密度,提升暴雨和气象干旱监测预警能力,提升气象灾害综合防御能力,建设防洪工程安全监控系统 and 黄土高原水土保持监测监管体系,提升防震减灾现代化建设能力,形成涵盖水灾害、水资源、水生态、水环境全要素的水文监测预报预警体系和保护治理全方位的智能感知网络体系。

(2)提高外部协同救援能力。黄河流域城市对社会应急救援力量的支持、管理、布局、使用参差不齐,导致社会救援力量生存、发展环境不同,技能类别、能力水平不一。针对上述问题,黄河流域城市应壮大各类救援队伍,编写《黄河流域社会救援力量名录》,出台黄河流域社会救援力量分类管理指南,探索发布区域社会救援力量发展指数和相关标准,建设区域性协同服务平台,完善区域社会救援力量发展协同机制,建设黄河流域社会应急救援网络体系,积极推动构建跨行政区和跨部门应急救援网络。

(3)推进产业结构调整。黄河流域区域产业发展不均衡<sup>[34]</sup>,产业结构层次偏低,以资源型产业和传统制造业为主,产业结构升级可抑制环境污染<sup>[35]</sup>。在“数字孪生”等现代技术背景下,黄河流域城市经济高质量发展同时加速实施产业结构升级策略,优化地区资源配置,推动黄河流域优势制造业绿色化转型、智能化升级和数字化赋能,实现以大数据驱动的应急资源布局,增强应急救援能力,助力城市可持续发展。

(4)控制人口总量。针对黄河流域人口密度大、人口分布不均匀等问题,转变过去为人口红利拉动经济发展的模式,因地制宜控制沿黄城市主城区人口密度。人口密度过大城区建设产城融合、职住平衡、生态宜居、交通便利的郊区新城,利用当地的劳动力、土地资源等优势吸引对劳动力依赖较大的产业,促进人口就近就业并实现城市化<sup>[36]</sup>。

(5)加强生态环境建设。截至2021年底,黄河流域城镇化率达62.30%,城市高速发展和转型过程中面临生态系统退化、水土流失严重等问题<sup>[37]</sup>,亟需制定城市生态基础设施标准和政策,鼓励沿黄城镇推进园林绿化提质工作,系统修复城市水系统、绿地、山体和废弃地,提高城市绿化覆盖率,推广延安、济南、银川等“城市双修”试点经验,因地制宜开展城市生态基础设施体系建设,提升沿黄城市生态系统质量和稳定性,增强城市生态空间的涵养、调节、支持、净化等服务能力。

(6)加大安全管理投入。黄河流域水旱灾害与地质灾害频发,黄河流域城市应完善与经济社会发展水平、财力相适应的各级财政投入机制,将防灾经费列入各级财政预算,对于黄河流域灾害风险防治工程与监测能力提升工程给予资金支持,如建立健全黄河流域备灾救灾监测网络和大数据平台,实现城市洪涝灾害风险智慧化管理“一张图”,构建地震灾害情景模拟系统等;鼓励科研机构和行业合作开展黄河流域水沙协同调控配

置基础理论和关键技术研究,加强宣传教育,建设防洪减灾科普阵地,创作防震减灾科普精品,增强社会公众对自然灾害的防范意识。

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.11.07.0001)。

## 参 考 文 献

- [1] 程书波,岳颖,刘玉,等.黄河流域洪涝灾害社会脆弱性评价与分析[J].人民黄河,2022,44(2):45-50.  
CHENG S B, YUE Y, LIU Y, et al. Evaluation and analysis of the social vulnerability of flood disasters in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2022, 44(2): 45-50.
- [2] 肖风劲,徐雨晴,黄大鹏,等.气候变化对黄河流域生态安全影响及适应对策[J].人民黄河,2021,43(1):10-14.  
XIAO F J, XU Y Q, HUANG D P, et al. Impact of climate change on ecological security of the Yellow River Basin and its adaptation countermeasures[J]. Yellow River, 2021, 43(1): 10-14.
- [3] 何艳玲,赵俊源.国家城市:转型城市风险的制度性起源[J].开放时代,2020(4):178-200.  
HE Y L, ZHAO J Y. National city: the institutional origin of the risk of transitional cities[J]. Open Times, 2020(4): 178-200.
- [4] 何艳玲,周寒.全球体系下的城市治理风险:基于城市性的再反思[J].治理研究,2020,36(4):5-19.  
HE Y L, ZHOU H. Urban governance risks under the global system: rethinking based on urbanity[J]. Governance Studies, 2020, 36(4): 5-19.
- [5] 吴佳,朱正威.公共行政视野中的城市韧性:评估与治理[J].地方治理研究,2021,23(4):31-43.  
WU J, ZHU Z W. Urban resilience in the view of public administration: evaluation and governance[J]. Local Governance Research, 2021, 23(4): 31-43.
- [6] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [7] 李彤玥,牛品一,顾朝林.弹性城市研究框架综述[J].城市规划学刊,2014(5):23-31.  
LI T Y, NIU P Y, GU C L. A review on research frameworks of resilient cities[J]. Urban Planning Forum, 2014(5): 23-31.
- [8] 张宇栋,吕淑然.从“城市安全”到“安全城市”:城市发展与安全的辩证分析[J].学习与实践,2018(6):74-82.  
ZHANG Y D, LYU S R. From "urban security" to the "safe city"[J]. Study and Practice, 2018(6): 74-82.
- [9] 罗通元.安全韧性学基本概念和理论体系探讨[J].安全与环境学报,2022,22(1):280-291.  
LUO T Y. Discussion on the basic concept and theoretical system of safety resilience science[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(1): 280-291.
- [10] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining urban resilience: a review[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 147: 38-49.
- [11] CARL F. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 253-267.
- [12] HOLLAND J H. Studying complex adaptive systems[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2006, 19(1): 1-8.
- [13] 黄弘,范维澄.构建“安全韧性城市”:概念、理论与实施路径[J].北京行政学院学报,2024(2):1-9.  
HUANG H, FAN W C. Building "safe and resilient cities": concepts, theories, and implementation approaches[J]. Journal of Beijing Administration Institute, 2024(2): 1-9.
- [14] 高禄,那仁满都拉,郭恩亮,等.基于绿色与安全理念的城市韧性评价研究:以呼和浩特市街道为例[J].灾害学,2024,39(1):216-221.  
GAO L, NA R, GUO E L, et al. Urban resilience evaluation research based on green safety concept: a case study of area of Hohhot street [J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 216-221.
- [15] 郭羽羽,罗福周,钟兴润.基于熵权-正态云模型的城市安全韧性评估研究[J].灾害学,2021,36(4):168-174.  
GUO Y Y, LUO F Z, ZHONG X R. Study on urban safety resilience assessment based on entropy weight-normal cloud model[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(4): 168-174.
- [16] 朱正威,郭瑞莲,袁玲.新安全格局背景下城市安全韧性评价框架:探索与构建[J].公共管理与政策评论,2024,13(3):138-151.  
ZHU Z W, GUO R L, YUAN L, et al. An evaluation framework for urban safety resilience in the context of new security pattern: exploration and construction[J]. Public Administration and Policy Review, 2024, 13(3): 138-151.
- [17] 方东平,李全旺,李楠,等.社区地震安全韧性评估系统及应用示范[J].工程力学,2020,37(10):28-44.  
FANG D P, LI Q W, LI N, et al. An evaluation system for community seismic resilience and its application in a typical community[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 28-44.
- [18] 张筱娟,汤琪凤,张镇.黄河流域城市韧性空间分异特征及其影响因素识别[J].地域研究与开发,2022,41(6):48-54.  
ZHANG X J, TANG Q F, ZHANG Z. Spatial differentiation characteristics and its influencing factors of urban resilience in the Yellow River Basin[J]. Areal Research and Development, 2022, 41(6): 48-54.
- [19] 罗巍,黄志华,程遂营,等.黄河流域城市韧性与经济发展水平协调性研究[J].人民黄河,2022,44(7):8-13.  
LUO W, HUANG Z H, CHENG S Y, et al. Study on the coordination between urban resilience and economic development level in the

- Yellow River Basin[J]. *Yellow River*, 2022, 44(7): 8-13.
- [20] 周成, 赵亚玲, 张旭红, 等. 黄河流域城市生态韧性与效率时空演化特征及协调发展分析[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(9): 1514-1523.  
ZHOU C, ZHAO Y L, ZHANG X H, et al. Spatiotemporal evolutionary characteristics and coordinated development of urban ecological resilience and efficiency in the Yellow River Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(9): 1514-1523.
- [21] 杨秀平, 贾云婷, 翁钢民, 等. 城市旅游环境系统韧性的系统动力学研究: 以兰州市为例[J]. *旅游科学*, 2020, 34(2): 23-40.  
YANG X P, JIA Y T, WENG G M, et al. A study on system dynamics of the resilience of urban tourism environment system: a case study of Lanzhou City[J]. *Tourism Science*, 2020, 34(2): 23-40.
- [22] 胡志强, 苗长虹, 熊雪蕾, 等. 产业集聚对黄河流域工业韧性的影响研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(5): 824-831.  
HU Z Q, MIAO C H, XIONG X L, et al. Influence of industrial agglomeration on the industrial resilience of the Yellow River Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(5): 824-831.
- [23] FORRESTER J W. Counterintuitive behavior of social systems[J]. *Theory and Decision*, 1971, 2(2): 109-140.
- [24] 何爱平, 安梦天. 黄河流域高质量发展中的重大环境灾害及减灾路径[J]. *经济问题*, 2020(7): 1-8.  
HE A P, AN M T. Major environmental disasters and disaster mitigation paths in high-quality development of the Yellow River Basin[J]. *On Economic Problems*, 2020(7): 1-8.
- [25] 缪惠全, 王乃玉, 汪英俊, 等. 基于灾后恢复过程解析的城市韧性评价体系[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(1): 10-27.  
MIAO H Q, WANG N Y, WANG Y J, et al. An urban resilience measurement system based on decomposing post-disaster recovery process[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(1): 10-27.
- [26] 王光辉, 王雅琦. 基于风险矩阵的中国城市韧性评价: 以 284 个城市为例[J]. *贵州社会科学*, 2021(1): 126-134.  
WANG G H, WANG Y Q. Evaluation of China's urban resilience based on risk matrix: a case study of 284 cities[J]. *Guizhou Social Sciences*, 2021(1): 126-134.
- [27] SHI P J, WANG J A, XU W, et al. World atlas of natural disaster risk[M]//SHI P J, KASPERSON R, eds. IHDP/Future Earth-Integrated Risk Governance Project Series. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015: 309-323.
- [28] 黄弘, 李瑞奇, 范维澄, 等. 安全韧性城市特征分析及对雄安新区安全发展的启示[J]. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(7): 5-11.  
HUANG H, LI R Q, FAN W C, et al. Analysis on characteristics of safety resilient city and enlightenments for safe development of Xiongan New Area[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(7): 5-11.
- [29] 孟晓静, 陈鑫, 陈佳静, 等. 组合赋权-TOPSIS 在洪涝灾害下城市区域韧性评估中的应用[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(5): 1465-1473.  
MENG X J, CHEN X, CHEN J J, et al. Application of combination weighting and TOPSIS in the assessment of urban regional resilience under flood disaster[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(5): 1465-1473.
- [30] 史斌, 刘弘涛. 城市防灾减灾规划的理念比较与路径整合[J]. *西部人居环境学刊*, 2022, 37(2): 100-106.  
SHI B, LIU H T. Comparison of concepts and path integration of urban disaster prevention and mitigation planning[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2022, 37(2): 100-106.
- [31] 苑清敏, 刘琪, 刘俊. 基于系统动力学的城市碳排放及减排潜力分析: 以天津市为例[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(6): 256-261.  
YUAN Q M, LIU Q, LIU J. On the reduced urban carbon emission and an analysis of such reduced emission potential based on the dynamic system by taking Tianjin as a case sample[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(6): 256-261.
- [32] 胡春宏, 张晓明, 赵阳. 黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 725-733.  
HU C H, ZHANG X M, ZHAO Y. Cause analysis of the centennial trend and recent fluctuation of the Yellow River sediment load[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 725-733.
- [33] 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 J, SHE J W, YUAN X M, 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.
- [34] 邵雅静. 气候变化和人类活动影响下的生态系统健康时空演变特征及分区管控: 以黄河流域为例[D]. 西安: 长安大学, 2022.  
SHAO Y J. Temporal and spatial evolution characteristics and zoning control of ecosystem health under the influence of climate change and human activities: a case study of the yellow river basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [35] 焦士兴, 林璐霜, 王安周, 等. 黄河流域 9 省区经济发展、产业结构与环境污染的关系[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(5): 22-30.  
JIAO S X, LIN L S, WANG A Z, et al. Relationship among the economic development, industrial structure and environmental pollution in the nine provincial regions of the Yellow River Basin[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition)*, 2024, 45(5): 22-30.
- [36] 张永芳, 周斌, 李蛟, 等. 黄河流域生态承载力及人地关系可持续发展: 基于异速生长模型的研究[J]. *西北人口*, 2024, 45(4): 112-126.  
ZHANG Y F, ZHOU B, LI J, et al. Spatial differentiation and management of man-land flexible relationship and ecological capacity in the Yellow River Basin: research based on allometric growth model[J]. *Northwest Population Journal*, 2024, 45(4): 112-126.
- [37] 瞿萌, 陈准, 闫明涛, 等. 黄河流域城镇化与生态环境耦合协调及交互胁迫关系研究[J]. *人民黄河*, 2023, 45(12): 19-24.

QU M, CHEN Z, YAN M T, et al. Study on the coupling and coordination of urbanization and ecological environment in the Yellow River Basin and the interaction stress relationship[J]. *Yellow River*, 2023, 45(12): 19-24.

## Simulation study on urban safety resilience in the Yellow River Basin based on multiple development scenarios

Ren Jie, Wang Di, Wang Yarong, Liu Ying

(School of Economics and Management; Industrial Informatization and Industrial Innovation Research Center, Key Research Base of Humanities and Social Sciences, the Inner Mongolia Autonomous Region; Yellow River "Ji Zi Wan" Development Research Center, The Key Research Base of Philosophy and Social Sciences in Inner Mongolia, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** Cities in the Yellow River Basin, known for their diverse geographical environments and fragile ecosystems, face significant disaster risks due to the complex interaction of various factors. These risks are characterized by the high degree of damage and the difficulty of implementing effective governance measures. By focusing on urban governance through the lens of urban resilience, a breakthrough is proposed by using a new framework of disaster resistance, adaptability, and recovery. A simulation model for urban safety resilience was constructed, targeting 64 cities in the Yellow River Basin to analyze the reasons behind the changes in urban safety resilience, resistance, adaptability, and recovery from 2010 to 2018. Multiple development scenarios were set to simulate the dynamic changes in urban safety resilience from 2019 to 2030. The results indicate that the urban safety resilience simulation model can be effectively used to analyze and predict changes in urban safety resilience. Both the disaster resistance index and recovery capacity index in the Yellow River Basin experienced two fluctuations during the simulation period. According to the *Yellow River Basin Ecological Protection and High-Quality Development Plan*, urban safety resilience in the Yellow River Basin will continue to improve, outperforming the status quo and baseline development scenarios. The study recommends that urban systems in the Yellow River Basin enhance safety resilience by improving monitoring and early warning systems, external collaborative rescue capabilities, industrial structure, population management, ecological environment construction, and safety management investments. This study provides theoretical references and decision-making support for enhancing urban safety resilience in the Yellow River Basin.

**Keywords:** Yellow River Basin; urban security resilience; multiple scenarios; simulation forecasting

[责任编辑 赵晓华 刘洋]

附 录

表 S1 城市安全韧性评估指标体系及权重

Tab. S1 Index system and weights for urban safety resilience assessment

目标层	准则层	指标层	约束层	单位	属性	权重
灾害抵抗能力	监测预警能力	灾害监测能力	水文站数量 $x_1$	个	+	0.031 0
			气象站数量 $x_2$	个	+	0.013 4
			地震台站数量 $x_3$	个	+	0.049 5
	城市生命线抗灾能力	信息传播能力	移动网络设备数 $x_4$	台	+	0.057 7
			人均互联网用户数 $x_5$	户/人	+	0.049 0
			信息保障能力	广播综合人口覆盖率 $x_6$	%	+
	城市生命线抗灾能力	城市基础设施抗灾能力	建筑物密度 $x_7$	%	-	0.005 0
			城市生活设施抗灾能力	用水普及率 $x_8$	%	+
		城市交通设施抗灾能力	燃气普及率 $x_9$	%	+	0.004 5
			人均用电量 $x_{10}$	kwh/人	+	0.115 7
人员抗灾能力	人员脆弱性	人均城市道路面积 $x_{11}$	m <sup>2</sup>	+	0.058 5	
		个人风险应对能力	人口密度 $x_{12}$	人/km <sup>2</sup>	-	0.063 4
	医疗服务保障	居民人均可支配收入 $x_{13}$	元	+	0.025 9	
自救互救能力	人口构成	千人卫生技术人员 $x_{14}$	人/千人	+	0.026 7	
		男性人口比例 $x_{15}$	%	+	0.005 2	
	受教育程度	15 岁以上 64 岁以下人口比例 $x_{16}$	%	+	0.011 3	
城市防灾能力	政府防灾能力	文盲人口占 15 岁以上人口比例 $x_{17}$	%	-	0.005 6	
		风险控制水平	灾害防治与应急管理支出 $x_{18}$	万元	+	0.032 4
	风险控制水平	年因灾经济损失占地区生产总值比例 $x_{19}$	%	-	0.001 3	
灾害恢复能力	城市生命线恢复能力	居民承受能力	年受灾人口比例 $x_{20}$	%	-	0.008 4
			关键行业人力准备能力	人均城市生产总值 $x_{21}$	万元/人	+
	医疗服务能力	医疗救助能力	生命线行业相关人员从业占比 $x_{22}$	%	+	0.061 0
			资源保障能力	千人病床数 $x_{23}$	张/千人	+
	资源保障能力	支撑保障投入	卫生支出占城市生产总值比例 $x_{24}$	%	+	0.093 1
公共安全支出比例 $x_{25}$			%	+	0.051 0	
灾害适应能力	社会保障能力	产业保障投入	第三产业占地区生产总值比例 $x_{26}$	%	+	0.020 3
			素质教育投入	教育支出占地区生产总值比例 $x_{27}$	%	+
	灾害救援能力	社会救援力量	社会组织密度 $x_{28}$	个/万人	+	0.041 8
	环境适应能力	城市生态环境	建成区绿化覆盖率 $x_{29}$	%	+	0.006 0
			城市生活质量	人均公园绿地面积 $x_{30}$	m <sup>2</sup> /人	+