

基于SSA-RF的东北三省洪涝灾害韧性评估

赵冲

辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2025年6月30日; 录用日期: 2025年8月1日; 发布日期: 2025年8月12日

摘要

为提升东北三省城市洪涝灾害韧性评估的科学性,本研究基于“驱动力-状态-响应”(DSR)模型构建动态评价体系,融合随机森林算法优化指标权重,并采用麻雀搜索算法加速参数寻优。2013~2022年东北三省35个地级行政区数据分析表明:时序上,黑龙江、吉林和辽宁省韧性指数总体呈上升趋势,但因极端降水 and 经济波动呈现阶段性波动;空间上,形成显著的“核心-边缘”梯度格局,沈阳、大连、哈尔滨、长春等高韧性核心城市对周边产生辐射效应,但铁岭、鹤岗等边缘城市受制于排水设施和信息基础设施等短板;驱动机制上,经济指标和信息能力是韧性分异的核心驱动力,而极端灾害下基础设施的“隐性短板”效应凸显。研究揭示通过强化经济支撑、信息赋能和区域协同机制促进韧性均衡发展,为东北洪涝治理提供决策依据。

关键词

韧性评估, DSR模型, 随机森林, 麻雀搜索算法, 东北三省

Flood Disaster Resilience Assessment in the Three Northeastern Provinces Based on SSA-RF

Chong Zhao

School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

Received: Jun. 30th, 2025; accepted: Aug. 1st, 2025; published: Aug. 12th, 2025

Abstract

In order to improve the scientificity of flood disaster resilience assessment in cities in the three northeastern provinces, this study constructs a dynamic evaluation system based on the “driving force-state-response” (DSR) model, integrates the random forest algorithm to optimize the index

weights, and uses the sparrow search algorithm to accelerate parameter optimization. Data analysis of 35 prefecture-level administrative regions in the three northeastern provinces from 2013 to 2022 shows that: in terms of time series, the resilience index of Heilongjiang, Jilin and Liaoning provinces generally shows an upward trend, but it fluctuates periodically due to extreme precipitation and economic fluctuations; in terms of space, a significant “core-edge” gradient pattern is formed, and high-resilience core cities such as Shenyang, Dalian, Harbin and Changchun have a radiation effect on the surrounding areas, but marginal cities such as Tieling and Hegang are constrained by shortcomings such as drainage facilities and information infrastructure; in terms of driving mechanism, economic indicators and information capabilities are the core driving forces of resilience differentiation, and the “hidden short board” effect of infrastructure under extreme disasters is prominent. The study reveals that strengthening economic support, information empowerment and regional coordination mechanisms can promote balanced development of resilience, providing a decision-making basis for flood control in Northeast China.

Keywords

Resilience Assessment, DSR Model, Random Forest, Sparrow Search Algorithm, Three Provinces in Northeast China

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球气候变化加剧极端降水事件的背景下，中国东北地区洪涝灾害呈现频次高、强度大、范围广的特征。东北三省作为国家粮食安全的核心保障区，洪涝灾害对农业生产的威胁已直接危及国家粮食安全与社会经济稳定[1]。水利工程与应急响应方面尽管取得进展，但当前治理仍过度依赖工程手段，缺乏系统性韧性策略[2]。

为提升城市洪涝灾害韧性，国内外学者已从多维度展开系统性研究。主要涵盖以下方面：(1) 韧性指标体系的构建与评价[3]：多采用模糊综合评价法[4]、层次分析法[5]、组合赋权法等对城市韧性进行静态打分[6]；(2) 风险识别与影响因素探测[7]：借助 GIS 空间分析、地理探测器等工具识别韧性空间分异规律[8]；(3) 工程与生态协同路径探讨[9]：聚焦高标准排水系统、防洪堤坝等工程设施建设[10]，或通过工程措施与生态措施相结合，构建“灰色-绿色”协同的防灾体系[11]；(4) 多学科方法融合与技术应用：开发高精度监测预警模型、创新性提出“组合赋权-云模型”评价体系[12]，结合城市生态安全、网络理论等多学科视角[13]，推动韧性研究向动态化、精细化发展。

当前韧性研究存在双重局限：一是传统静态指标体系难以捕捉灾害动态过程与城市复杂系统的非线性响应，虽引入动态模型却缺乏区域适配性；二是研究尺度失衡，多聚焦单一城市或宏观区域，忽视“核心-边缘”城市结构的韧性差异。

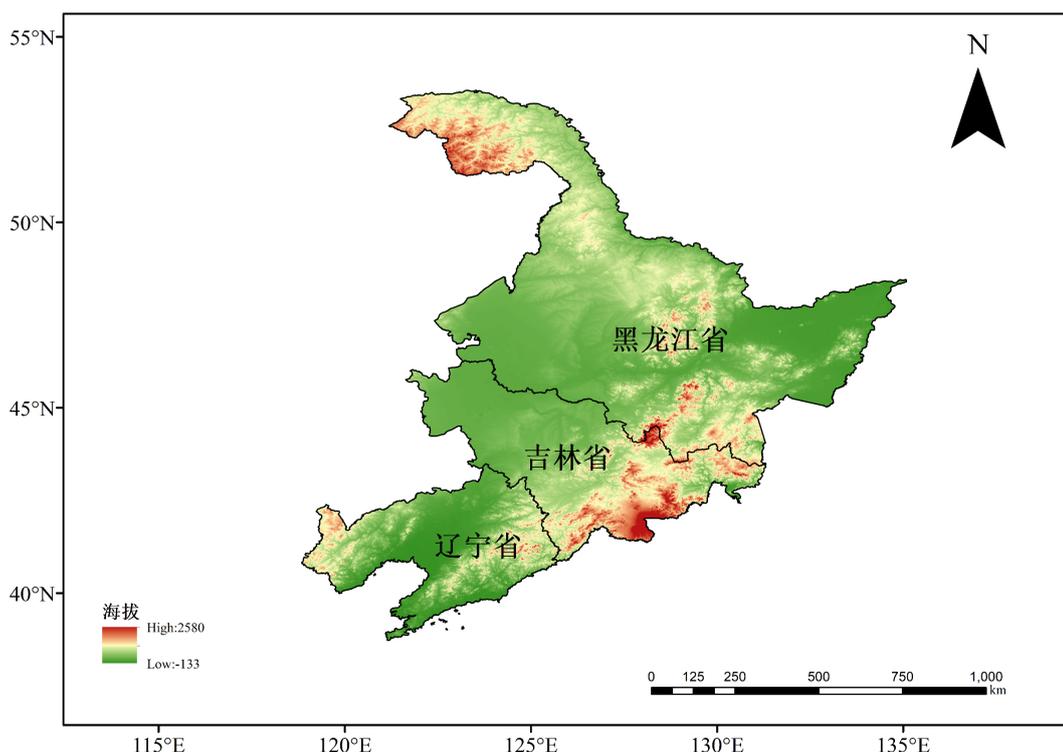
为揭示灾害系统内在耦合机制，精细化识别不同层级城市韧性特征，填补区域研究空白，本研究创新性地聚焦东北三省 2013~2022 年城市尺度韧性演化，融合动态模拟与空间分析。构建“驱动力-状态-响应(DSR)”动态模型框架[14]，引入随机森林算法优化指标赋权以提升非线性建模能力[15]，采用麻雀搜索算法加速参数寻优[16]。将为东北三省构建科学、可持续的洪灾治理体系提供兼具理论创新性与实践指导价值的决策支撑，推动中国特色灾害韧性理论的发展。

2. 研究区和数据来源

2.1. 研究区概况

东北三省(39°N~53°N, 119°E~135°E)主要包括黑龙江省、吉林省以及辽宁省(图 1), 总面积约 80.91 万 km²。本文研究范围涵盖东北三省全部地级及以上城市(大兴安岭地区除外), 共 34 个城市及 1 个自治州 [17]。这些城市构成东北三省城市化与经济活动的主要承载空间, 是本研究城市洪涝灾害韧性评估的核心单元。

东北三省降水时空不均, 年均 400~1000 mm, 70%以上集中于 6~8 月汛期, 易发短时强降雨。人口方面, 2022 年末三省总人口 9718 万, 老龄化率达 25.7%, 显著高于全国(19.8%), 加剧洪涝应对中医疗与人员转移的挑战。经济结构呈现“三产失衡、一产偏高”特征, 第一产业 GDP 占比普遍超全国均值; 耕地资源丰富, 黑龙江粮食产量 7750 万吨(占全国 11.4%), 农业主导格局使洪涝对城乡融合区影响尤为关键。城市经济极化显著: 2022 年沈阳和大连 GDP 占辽宁 52%(1.3 万亿), 哈尔滨和长春各占本省近 40%(超 7000 亿)。核心城市基建与资源调配能力强, 而边缘城市在韧性建设中易出现“短板效应” [18]-[20]。



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS (2020) 4619 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 1. Overview of the study area

图 1. 研究区概况

2.2. 数据来源

研究数据主要来源于 2013~2022 年的研究区域各省和各城市的统计年鉴以及《国民经济和社会发展统计公报》。由于数据缺失等原因, 研究区域不包括大兴安岭地区。并采用相邻年份均值法和插值算法来补全矫正个别缺失和错误数据。

为科学量化东北三省城市在面对洪涝灾害面前的承压能力、应对能力与恢复能力, 本文以“驱动力

- 状态 - 响应(DSR 模型)”为理论支撑, 结合城市复杂性、动态性与多维互动特征[14], 综合反映城市在不同阶段应对洪涝灾害的综合能力, 构建城市洪涝灾害评估体系(表 1), 识别影响城市的关键变量, 为后续模型评估、空间分析与政策优化提供基础支撑。

在此框架下, 基于系统性、可操作性原则的指导构建出的指标体系共包括 3 个一级指标(驱动力、状态、响应), 并下设 16 个二级指标, 具体如下:

Table 1. Evaluation index system for urban flood disaster resilience

表 1. 城市洪涝灾害韧性评估指标体系

目标层	准则层	指标层	单位	含义及性质
城市洪涝灾害韧性评估指标体系	驱动力	年降水量 C ₁₁	mm	气候变化风险(-)
		水域面积 C ₁₂	km ²	蓄滞雨水
		城市化水平 C ₁₃	%	地区发展程度
		城镇居民人均可支配收入 C ₁₄	元	经济系统内在活力
	状态	人均道路面积 C ₂₁	m ² /人	道路交通运输应急疏散能力
		建成区排水管道密度 C ₂₂	km/km ²	城市排污防涝能力
		规模以上工业企业数 C ₂₃	个	城市工业经济实力
		常住人口密度 C ₂₄	人/km ²	人口规模与集聚程度(-)
		地均 GDP C ₂₅	万元/km ²	地均经济实力
		第三产业比重 C ₂₆	%	经济结构合理程度
		人均 GDP C ₂₇	元	人均经济实力
	响应	移动电话普及率 C ₃₁	部/百人	预警信息传达能力
		建成区绿化覆盖率 C ₃₂	%	城市灾害分解能力
		万人医疗卫生机构床位数 C ₃₃	张/万人	城市医疗救助能力
		万人高等学校在校学生 C ₃₄	人/万人	城市学习适应能力
		社会保障与就业支出占比 C ₃₅	元/人	政府保障能力

注: (-)表示该指标为负向指标。

Table 2. Classification standard for urban flood disaster resilience evaluation indices

表 2. 城市洪涝灾害韧性评估指标等级划分标准

等级	C ₁₁ /mm	C ₁₂ /km ²	C ₁₃ /%	C ₁₄ /元	C ₂₁ /(m ² /人)	C ₂₂ /(km/km ²)	C ₂₃ /个	C ₂₄ /(人/km ²)
I级	>1200	<200	<45	<24000	<4	<3	<350	>6800
II级	(900, 1200]	[200, 500)	[45, 60)	[24000, 31000)	[4, 13)	[3, 6)	[350, 900)	(3700, 6800]
III级	(700, 900]	[500, 1000)	[60, 70)	[31000, 39000)	[13, 20)	[6, 9)	[900, 2100)	(1500, 3700]
IV级	≤700	≥1000	≥70	≥39000	≥20	≥9	≥2100	≤1500
等级	C ₂₅ /(万元/km ²)	C ₂₆ /%	C ₂₇ /元	C ₃₁ /(部/百人)	C ₃₂ /%	C ₃₃ (张/万人)	C ₃₄ (人/万人)	C ₃₅ (元/人)
I级	<700	<18	<37000	<40	<4	<45	<70	<1400
II级	[700, 1800)	[18, 41)	[37000, 54000)	[40, 100)	[4, 33)	[45, 58)	[70, 170)	[1400, 2600)
III级	[1800, 3400)	[41, 51)	[54000, 79000)	[100, 130)	[33, 41)	[58, 71)	[170, 310)	[2600, 4300)
IV级	≥3400	≥51	≥79000	≥130	≥41	≥71	≥310	≥4300

为了更直观地呈现和对比不同城市的指标数据，本研究采用自然间断点法对 2013 年至 2022 年间的城市洪涝灾害韧性指标进行分级处理：低韧性(I级)、较低韧性(II级)、较高韧性(III级)和高韧性(IV级)。在实际操作中，根据具体情况进行一些调整，以确保分级结果更加符合实际情况。具体的分级结果可以参考表 2。

2.3. 研究方法

本研究基于 DSR 模型构建城市洪涝灾害韧性指标体系，并通过随机森林优化算法(Random Forest, RF) [15]与麻雀搜索算法(Sparrow Search Algorithm, SSA) [16]联合建模，进行多指标权重分配与韧性指数计算。

2.3.1. DSR 模型结构设计

DSR 模型是由“驱动力 - 状态 - 响应”三大系统构成的系统方法，强调动态演化逻辑，适用于复杂系统的适应性评估。城市韧性可建模为多维指标函数的加权组合：

$$R_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot x_{ij}$$

式中， R_i 为第 i 个城市的综合韧性得分； x_{ij} 为第 j 个指标的标准化值； w_j 为第 j 个指标的权重； n 为指标总数(本研究为 16 项)。

2.3.2. 随机森林优化算法

随机森林基于多个决策树的集成结果进行回归预测，优势包括对非线性特征处理能力强、能评估各特征变量的重要性，适合复杂系统中的多因子评估问题。模型输出为每棵树 $h(x, \theta_k)$ 的平均预测值：

$$f(x) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K h(x, \theta_k)$$

式中， x 为输入特征向量； K 为树的总数； θ_k 为第 k 可数的随机向量。

2.3.3. 麻雀搜索算法(SSA)优化

初始化麻雀种群及相关参数。为平衡算法的搜索能力和计算效率，设定最大迭代次数为 100，种群数量为 10。利用得到的最优参数对随机森林进行训练，从而获得特征重要度，进而通过归一化处理得到指标权重(表 3)。

Table 3. Calculation results of index system weights

表 3. 指标体系权重的计算结果

		驱动力 0.2984				状态 0.4430			
指标权重	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	
	0.1140	0.0964	0.0032	0.0850	0.0838	0.0723	0.0858	0.0539	
		响应 0.2584							
指标权重	C_{25}	C_{26}	C_{27}	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	C_{35}	
	0.0699	0.0228	0.0546	0.0399	0.0020	0.0700	0.0707	0.0759	

2.3.4. 城市洪涝灾害韧性指数计算与分级

根据优化后的随机森林模型输出指标权重，代入公式计算城市洪涝灾害韧性指数 R_i ，其值域为[0, 1]，

值越接近 1，表示城市韧性水平越高；反之，值越接近 0，表示城市韧性水平越低。为准确区分城市洪涝灾害韧性水平的高低与差异，采用自然间断点法对 2013~2022 年东北三省城市洪涝灾害韧性指数进行等级划分，低韧性(0, 0.3725]、较低韧性(0.3725, 0.4482]、较高韧性(0.4482, 0.5691]和高韧性(0.5691, 1]四个等级区间。为确定模型的准确性，本文选取均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)两个指标对模型的性能进行训练及与测试集精度检验。模型中的训练集和测试集的 RMSE 值分别为 0.00421 和 0.01282， R^2 值分别为 0.99999 和 0.99998。此外，训练集和测试集的 RMSE 和 R^2 差值较小，表明模型具有较高拟合度与良好泛化性能，适用于城市洪涝灾害韧性测度与动态演化分析。

3. 结果

3.1. 城市洪涝灾害韧性时空格局演变

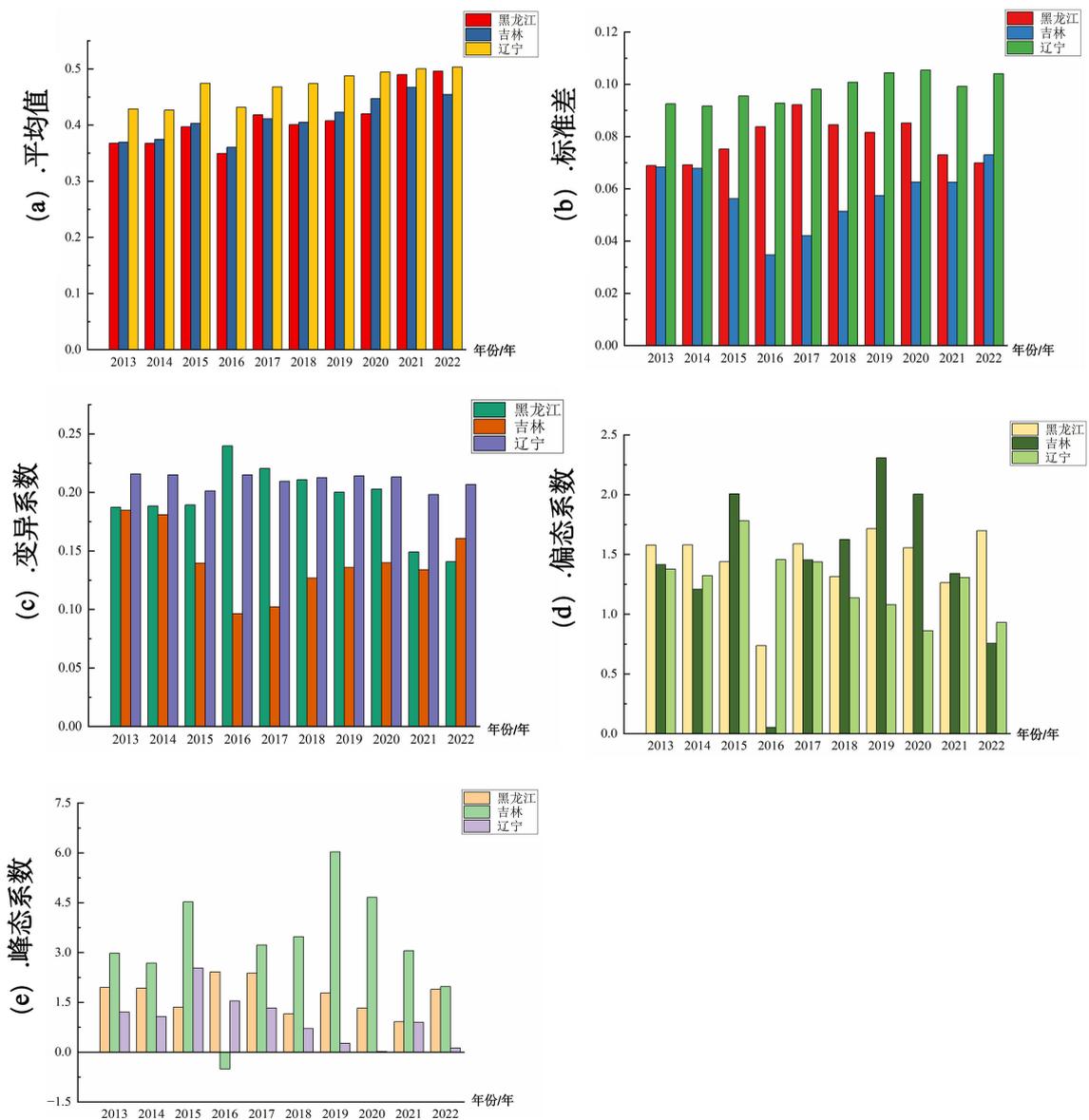
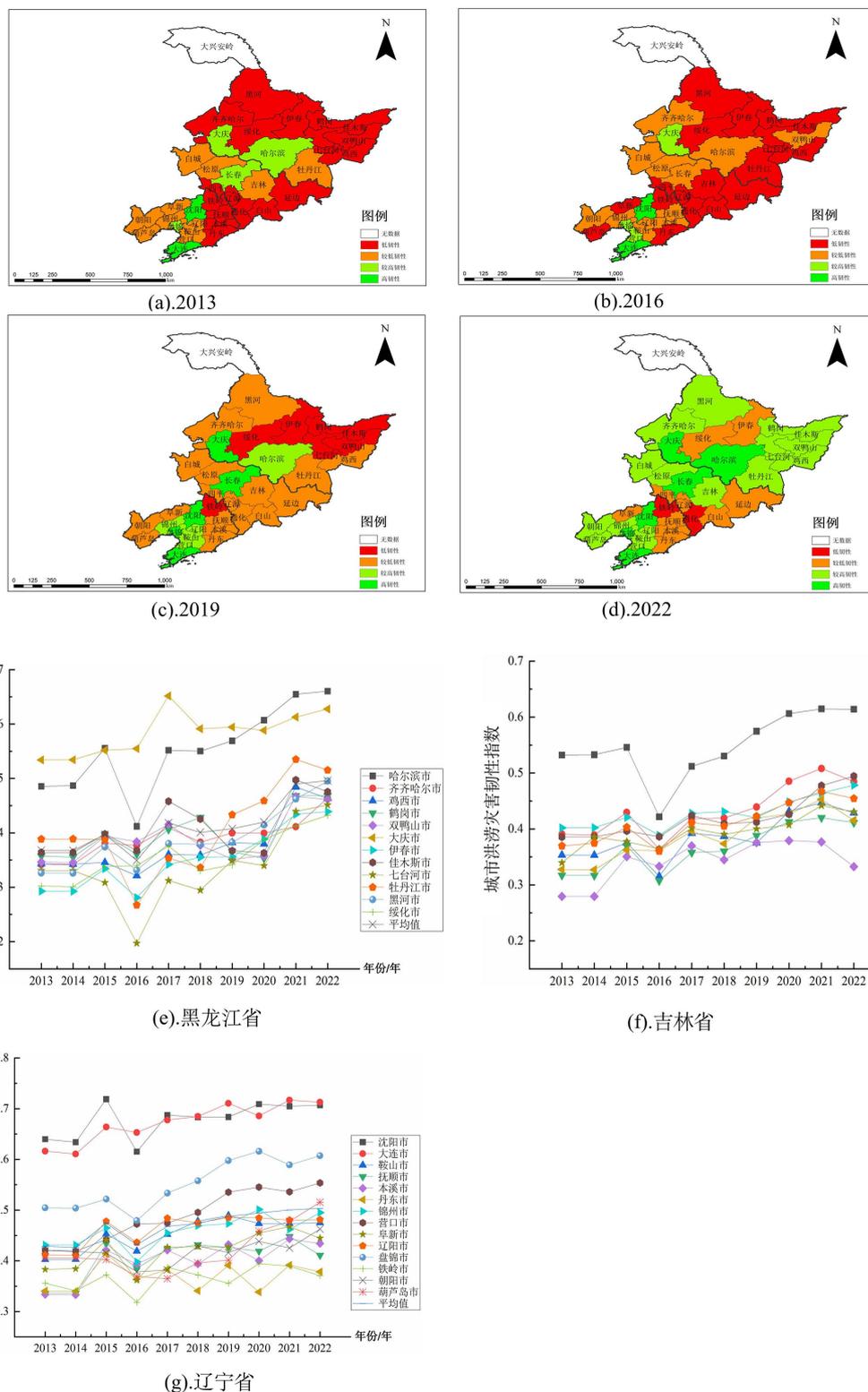


Figure 2. Descriptive statistics of resilience values for provincial-level cities in the three northeastern provinces of China
图 2. 东北三省省级城市韧性值描述性统计量



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 3. Schematic diagram of spatial distribution and temporal variation of urban flood disaster resilience index in the three northeastern provinces

图3. 东北三省城市洪涝灾害韧性指数空间分布与时间变化示意图

本研究基于东北三省 35 个地级行政区 2013~2022 年洪涝灾害韧性指数评估结果,采用省域尺度分析其时空演变规律(图 2)。整体趋势呈现缓慢上升、局部波动的特征:① 各省的城市洪涝灾害韧性指数相对较高,平均值总体呈上升态势(图 2(a))。② 黑龙江省、吉林省和辽宁省的标准差介于 0.0680~0.0930、0.0340~0.0730 和 0.0910~0.1060 之间,表明城市洪涝灾害韧性指数的离散程度较大,且各地区之间存在差异性(图 2(b))。③ 东北三省变异系数总体呈现降低趋势明显,说明近年来城市洪涝灾害韧性指数的空间差异性呈缩小态势(图 2(c))。④ 东北三省偏态系数均为正值,黑龙江省在 2013~2022 年有增大趋势,说明城市洪涝灾害韧性指数高等级地区数量占比有所增加(图 2(d))。⑤ 东北三省峰态系数在 2013~2022 年总体呈降低态势,说明城市韧性指数相似地区分散分布。

(1) 黑龙江省洪涝韧性指数十年间提升 34.92%,但受极端降水影响,2014、2016 及 2018 年出现阶段性下降。所有城市韧性终期均高于初期,哈尔滨和伊春增幅显著,鸡西等城市则呈先降后升趋势(图 3(e))。空间上呈现“西高东低”梯度格局:西部哈尔滨、大庆因经济与应急优势稳居高韧性等级,东部鹤岗、七台河等地因基础设施薄弱处于低韧性区间。高韧性城市数量从 2 个增至 10 个,但核心城市外溢效应不足,东西部差距持续存在(图 3(a))。

(2) 吉林省韧性起点与终点均低于邻省,研究时段内整体提升但波动明显(2016、2018、2022 年下降)(图 3(f))。长春作为唯一高韧性核心城市,韧性增长 26.93%并带动周边,但白城、松原等北部城市提升缓慢。空间呈典型单核递减结构:长春始终为高韧性核心,外围白山、通化等地因人口流失、财政不足长期处于低韧性区间。高韧性城市增至 4 个,但核心与非核心城市差距显著,需强化区域一体化以增强辐射效应(图 3(b))。

(3) 辽宁省韧性水平居东北三省之首,研究时段内增长 31.10%,波动小于黑吉两省(图 3(g))。沈阳、大连构成“双核驱动”,大连 2022 年韧性指数(0.3581)全省最高;营口增幅显著,朝阳呈先降后升趋势。空间呈“中枢-边缘”格局:核心城市及鞍山等周边城市韧性强劲,但铁岭(0.2238)、阜新等边缘城市严重滞后。高韧性城市增至 9 个,但边缘区信息基础设施(C_{31})、高教资源(C_{34})及排水设施(C_{22})短板制约全域均衡发展(图 3(c))。

3.2. 东北三省城市洪涝灾害韧性影响因素探测

基于 DSR 模型构建的指标体系,并采用随机森林与麻雀搜索算法联合优化权重后,本研究运用地理探测器实证检验各指标对东北城市洪涝灾害韧性的空间解释力,揭示其形成与演化的关键驱动机制(表 4)。研究发现,东北三省城市洪涝灾害韧性呈现“社会-经济-设施”复合驱动特征,经济发展居于核心地位,信息支撑发挥关键作用,基础设施与社会保障则提供协同保障。从 2013~2022 平均 q 值分析,经济类指标的主导作用最为显著。其中,地均 GDP (C_{25})和人均可支配收入(C_{14})在多个年份解释力稳居前两位,特别是在 2019 年达到峰值, q 值分别高达 0.87 和 0.84,充分证明城市整体经济承载能力和居民个体财富水平是应急响应能力与灾后恢复效率最根本的支撑。同时,信息类指标如移动电话普及率(C_{31})和高等学校学生密度(C_{34})的解释力保持稳定且重要性持续显现,部分年份 q 值突破 0.6,凸显高效通信网络带来的风险感知与信息传播能力,以及智力资本所支撑的组织动员能力,是提升韧性治理效率的关键基础。

值得注意的是,状态类的基础设施指标如排水管道密度(C_{22})与人均道路面积(C_{21}),虽然在权重分配中相对偏低,表明其在常态韧性评估体系中可能被低估,但在极端灾害年份其 q 值会出现显著跃升。这种现象揭示这些设施作为“潜在韧性短板”的特性,在突发高强度灾害冲击下,其响应能力会阶段性突增,成为系统稳定性的关键决定因素,若常态投入不足,此时极易构成巨大冲击。

东北城市洪涝灾害韧性的塑造是经济基础、信息能力、设施条件与社会保障等多维度因子在时空尺

度上动态协同作用的结果，常态下的资源配置优化与极端情境下的应急响应效能共同决定区域韧性的整体格局与演化路径。

Table 4. The explanatory power of driving factors on urban resilience in the three northeastern provinces of China
表 4. 驱动因子对东北三省城市韧性的解释程度

年份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2013	C ₂₅ (0.66)	C ₁₄ (0.66)	C ₃₁ (0.65)	C ₂₇ (0.63)	C ₃₄ (0.61)	C ₂₃ (0.54)	C ₃₅ (0.51)	C ₂₂ (0.25)	C ₃₃ (0.21)	C ₂₆ (0.18)
2014	C ₁₄ (0.72)	C ₂₅ (0.64)	C ₃₁ (0.64)	C ₂₇ (0.63)	C ₃₄ (0.61)	C ₃₅ (0.55)	C ₂₃ (0.52)	C ₂₆ (0.50)	C ₃₃ (0.23)	C ₂₂ (0.22)
2015	C ₁₄ (0.78)	C ₂₅ (0.76)	C ₃₄ (0.70)	C ₂₃ (0.65)	C ₂₇ (0.61)	C ₃₅ (0.58)	C ₃₁ (0.47)	C ₃₃ (0.35)	C ₂₁ (0.30)	C ₂₂ (0.30)
2016	C ₁₄ (0.75)	C ₃₅ (0.72)	C ₂₅ (0.67)	C ₃₄ (0.53)	C ₂₇ (0.50)	C ₂₃ (0.37)	C ₃₃ (0.35)	C ₃₁ (0.24)	C ₁₃ (0.23)	C ₂₂ (0.18)
2017	C ₁₄ (0.82)	C ₂₇ (0.74)	C ₂₅ (0.70)	C ₃₄ (0.53)	C ₃₁ (0.52)	C ₃₅ (0.51)	C ₂₂ (0.50)	C ₂₃ (0.41)	C ₂₁ (0.27)	C ₃₃ (0.26)
2018	C ₁₄ (0.77)	C ₂₅ (0.75)	C ₂₇ (0.70)	C ₂₂ (0.65)	C ₃₅ (0.63)	C ₃₁ (0.58)	C ₃₄ (0.54)	C ₂₃ (0.54)	C ₂₁ (0.47)	C ₃₃ (0.45)
2019	C ₂₅ (0.87)	C ₁₄ (0.84)	C ₂₇ (0.81)	C ₂₃ (0.68)	C ₃₅ (0.66)	C ₃₄ (0.58)	C ₃₁ (0.47)	C ₂₂ (0.37)	C ₂₁ (0.30)	C ₃₃ (0.25)
2020	C ₂₅ (0.75)	C ₂₇ (0.74)	C ₁₄ (0.73)	C ₂₃ (0.70)	C ₃₄ (0.59)	C ₃₅ (0.57)	C ₃₁ (0.53)	C ₂₂ (0.37)	C ₁₁ (0.27)	C ₂₁ (0.27)
2021	C ₃₄ (0.66)	C ₁₄ (0.65)	C ₂₅ (0.65)	C ₂₃ (0.65)	C ₃₁ (0.61)	C ₂₇ (0.52)	C ₃₅ (0.46)	C ₃₃ (0.43)	C ₂₁ (0.22)	C ₂₂ (0.22)
2022	C ₂₅ (0.63)	C ₃₁ (0.62)	C ₂₃ (0.60)	C ₁₄ (0.59)	C ₃₄ (0.57)	C ₃₅ (0.55)	C ₂₇ (0.47)	C ₂₂ (0.26)	C ₃₃ (0.21)	C ₂₁ (0.21)

注：C_i (i = 1, 2, ..., 16) 指标含义见表 1；括号内数字表示该项指标因子对应的 q 值；表格中只显示对应年份的解释程度前十的指标因子。

4. 结论

本文基于 DSR 模型建立城市洪涝灾害韧性指标体系，并采用随机森林优化算法构建了城市洪涝灾害韧性评估模型。通过对 2013~2022 年东北三省城市洪涝灾害韧性时空演变特征分析，得出以下结论：

(1) 从时间序列来看，黑龙江、吉林、辽宁三省的城市洪涝灾害韧性指数呈整体上升趋势，但受极端降水、经济波动或基建阶段性发展影响，部分年份出现短暂下降。长期来看，随着灾害认知深化和应对措施完善，韧性向好的态势持续。各城市发展路径差异显著：部分城市韧性持续提升，部分城市则经历“先降后升”过程，体现个体发展轨迹的独特性。

(2) 从空间格局来看，韧性等级空间分布不均衡，呈现明显区域结构。核心城市的高韧性对周边产生辐射带动作用，凸显区域协同与资源共享对提升整体韧性的重要性。当前低韧性城市仍集中于东北三省的西南部和东北部，需重点加强这些区域的防洪基建与应急管理能力，以促进韧性均衡发展。

(3) 从影响因素来看，经济指标(居民可支配收入、地均 GDP、人均 GDP)、社会科技因素(移动电话普及率、高校在校生数量)及保险密度对韧性空间分异解释力最强。经济水平支撑灾后恢复与资源调配；通信能力与人才储备提升应急响应效率；保险机制分散灾害风险。值得注意的是，自然因素(如年降水量)与社会经济因素(如城市化水平)对韧性的影响力随城市发展阶段动态变化，表明韧性是多重因素交互作用的动态结果。

参考文献

- [1] 李保国, 刘忠, 黄峰, 等. 巩固黑土地粮仓保障国家粮食安全[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1184-1193.
- [2] 仇保兴, 姚永玲, 刘治彦, 等. 构建面向未来的韧性城市[J]. 区域经济评论, 2020(6): 1-11.
- [3] 黄亚江, 李书全, 李益铎, 等. 基于 DEMATEL-ISM-ANP 的地铁运营安全韧性综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 171-177.

-
- [4] 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.
- [5] 张明斗, 冯晓青. 中国城市韧性度综合评价[J]. 城市问题, 2018(10): 27-36.
- [6] 唐清竹, 徐宗学, 王京晶, 等. 深圳河流域城市洪涝风险分析[J]. 水力发电学报, 2023, 42(6): 13-22.
- [7] 方叶林, 黄家彤, 黄震方, 等. 中国沿海三大城市群旅游经济韧性的影响因素及组态效应[J]. 经济地理, 2024, 44(11): 204-211.
- [8] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [9] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析[J]. 经济地理, 2022, 42(8): 51-61.
- [10] 陈娜, 向辉, 马伯, 等. 基于韧性理念的中国城市雨洪管理研究热点与趋势[J]. 应用生态学报, 2022, 33(11): 3137-3145.
- [11] 董贺轩, 王云静, 吴巍. 城市中小型灰色基础设施与公共空间一体化整合研究[J]. 新建筑, 2022(5): 141-146.
- [12] 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, 36.
- [13] 施生旭, 童佩珊. 基于 CiteSpace 的城市群生态安全研究发展态势分析[J]. 生态学报, 2018, 38(22): 8234-8246.
- [14] 张苗, 陈银蓉, 周浩. 基于 DSR 模型的城市土地低碳集约利用评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 169-175.
- [15] 吴立志, 陈振南, 张鹏. 基于随机森林算法的城市火灾风险评估研究[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 54-60.
- [16] 付华, 刘昊. 多策略融合的改进麻雀搜索算法及其应用[J]. 控制与决策, 2022, 37(1): 87-96.
- [17] 史慧影. 东北地区城市韧性时空特征分析[J]. 可持续发展, 2022, 12(2): 361-370.
- [18] 张运福, 胡春丽, 赵春雨, 等. 东北地区降水年内分配的不均匀性[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(2): 89-94.
- [19] 王宗明, 张柏, 宋开山, 等. 东北地区农业土地资源潜力评价模型及其应用[J]. 生态科学, 2007, 26(4): 351-360.
- [20] 孙平军, 丁四保, 修春亮, 等. 东北地区“人口-经济-空间”城市化协调性研究[J]. 地理科学, 2012, 32(4): 450-457.