

基于熵权 TOPSIS-SD 模型的洪涝减灾力 时空演变及多情景模拟

刘玮¹, 陈姝琰¹

(1.湖南农业大学 公共管理与法学学院,湖南 长沙 410128)

摘要:【目的】为探索洪涝减灾力的动态演变规律,以湖南省 14 市(州)为研究区,构建融合熵权 TOPSIS 与系统动力学模型的评价-模拟体系,对区域洪涝减灾力进行多情景仿真分析。【方法】基于洪涝减灾力评价指标体系,采用熵权 TOPSIS 法评估湖南省 14 市(州)洪涝减灾力现状,再通过系统动力学模型模拟在现状基准型、经济资源强化型、教育医疗协同型、防洪设施强化型、减灾能力综合型五种发展情景下湖南省 14 市(州)洪涝减灾力的时空演变趋势。【结果】①TOPSIS 评价与 SD 模型模拟结果在空间分布上具有较高一致性:湘东地区洪涝减灾力整体较强,湘西及湘西北地区相对较弱。②湖南省 14 市(州)洪涝减灾力增长类型可分为高提升型、稳定型和低提升型。③不同情景下的洪涝减灾力仿真效果呈现区域适配性:经济资源强化型适用于中低经济发展地区,减灾能力综合型适用于经济水平较高但结构单一的地区;教育医疗协同型在经济基础较好的地区成效显著;防洪设施强化型的提升效果有限,难以单独作为洪涝减灾力提升策略。【结论】洪涝减灾力存在区域差异,应根据区域经济发展特性因地制宜,以提升区域整体减灾水平。

关键词:洪涝灾害;减灾力;熵权 TOPSIS—SD;时空动态模拟;多情景分析

中图分类号:X43

文献标识码:A

全球气候变暖加剧了极端降雨事件的发生频率,导致洪涝灾害频发^[1]。2024 年上半年,全国平均降水量达 316.9 mm,引发了暴雨、山洪等次生灾害,造成 1 434 万人次受灾,直接经济损失高达 5 921 亿元^[2]。在此背景下,系统评估区域洪涝减灾力,对实现科学的风险管理和有效的灾害防治具有重要意义^[3]。

目前,在评估体系方面,唐彦东等^[4]、李娜等^[5]从致灾因子、孕灾环境等维度探讨了防灾、抗灾与救灾等应急管理全过程^[6]。在评估方法方面,国内学者李洁等^[7]通过网格尺度识别洪涝风险因子,李继清等^[8]利用加权灰色关联度法计算综合风险等级,张金萍等^[9]构建城市内涝模型评估洪涝应急响应能力;国外学者 BHATTARAI R 等^[10]基于历史灾情数据开展定量评估与趋势推断、RINCÓN D 等^[11]采用概率风险模型模拟灾害发生概率及潜在损失,SAJJAD A 等^[11]结合地理信息系统与遥感技术进行灾害空间分布和暴露度分析。在评估理论方面,田源等^[13]、岳清瑞等^[14]运用“风险源-承灾体-减灾力”理论对城市工业或地震灾害进行减灾力研究。综上所述,虽然目前关于洪涝灾害风险评估研究颇

丰,但大多局限于静态单一的情景分析,缺乏对各要素间反馈关系的动态多情景分析及单独对洪涝减灾能力的系统研究。

研究基于灾害生命周期理论、系统韧性理论与风险感知理论构建洪涝减灾力评价体系,采用熵权 TOPSIS 法对湖南省 14 市(州)洪涝减灾力进行静态评价,并运用系统动力学模型进行仿真模拟与多情景分析,探索在不同发展策略下区域洪涝减灾力的时空演变特征及最优发展策略。研究创新点如下:(1)构建融合预防—准备—反应—恢复(Prevention,Preparedness,Response and Recovery model,PPRR)模型、系统韧性与风险感知理论的多理论、跨学科评价框架,为科学评估区域洪涝减灾力提供理论依据。(2)采用熵权逼近理想解排序法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution,TOPSIS)与系统动力学(System Dynamics,SD)模型,从现状到未来、动态与静态综合分析的视角,系统地评价洪涝减灾力时空演变,揭示其现状分布及未来发展特征。(3)通过多情景模拟提出洪涝减灾力优化方案,并为具有相同情况的其他地区提供理论与实际借鉴。

收稿日期/Received:2025-03-07

修回日期/Revised:2025-05-27

基金项目:国家社科基金项目(21BSH001)。

第一作者:刘玮(1976—),女,教授,博导,博士,从事公共危机管理与应急管理方面的研究。E-mail:liuwei0901@126.com。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

湖南省地处长江中游,下辖 14 个市(州),地势总体西高东低,如图 1 所示。

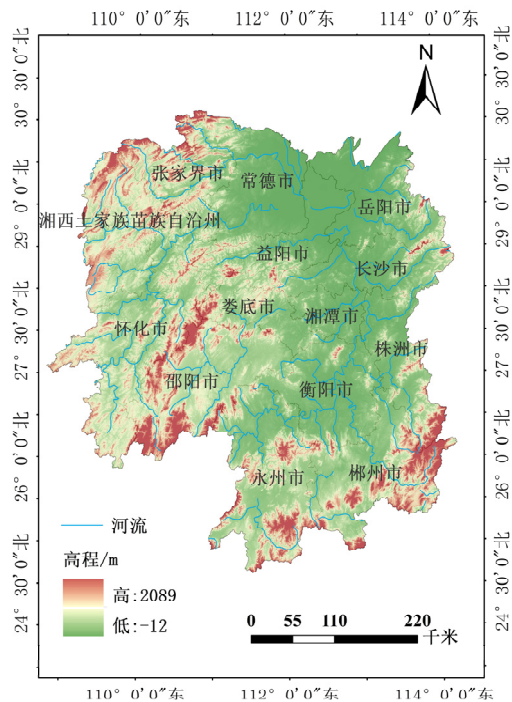


图 1 研究区概况

Fig.1 Location of the study area

省内有湘江、资江、沅江和澧水四大河流贯穿,中部丘陵与平原交错分布,北部地势低洼,复杂的地

形地势加剧了洪水的汇流和蓄滞特性。2024 年汛期全省共出现 21 次暴雨过程,平均降雨量达 1 156.6 mm^[15]。其中,郴州市多个乡镇遭遇特大暴雨,雨量突破历史极值^[16];岳阳市平江县遭遇自有气象记录以来持续时间最长、强度最大、雨量最多的一次汛情^[17],频发的暴雨洪涝灾害对当地经济、人民生活 and 生态环境构成严重威胁。

1.2 数据来源

研究选取 2013—2022 年社会、经济、环境及 DEM 数据作为基础数据,数据主要来源于湖南省统计局、国家统计局、湖南省及其 14 市(州)的统计年鉴、数据库及地理空间数字云等权威平台。对于个别指标的少量缺失,在 Stata 软件中采用线性插值法进行补充^[18]。

2 指标体系构建与研究方法

2.1 指标体系的构建、熵权 TOPSIS 法与评价

洪涝减灾力指标体系以灾害生命周期理论中 PPRR 模型^[19]为框架,一方面引入系统韧性理论^[20],突出抢险救灾能力、社会基础支持和承灾体脆弱性在灾后恢复中的核心作用,另一方面引入风险感知理论^[21],强调监测预警能力与防洪除涝能力在风险识别与行为响应中的基础支撑地位。最终依据数据可得性和指标代表性的标准进行筛选,构建包含 5 个一级指标和 15 个二级指标的评价体系,形成了多理论支撑、跨学科融合的洪涝减灾力评价理论框架,见表 1。

表 1 洪涝减灾力评价指标

Table 1 Flood disaster emergency disaster reduction capacity evaluation index

目标层	一级指标	二级指标	编号	属性	权重	来源
洪涝减灾力	社会基础支持	普通高校在校生率(%)	V1	+	0.269 9	王伟等 ^[22]
		人均地区生产总值(万元)	V2	+	0.106 7	郑德凤等 ^[3]
		建成区绿化覆盖率(%)	V3	+	0.000 2	孟晓静等 ^[23]
		人均可支配(元/人)	V4	+	0.078 7	王伟等
		人均粮食产量(t/人)	V5	+	0.029 8	胡俊峰等 ^[24]
	承灾体脆弱性	公共财政支出(万元)	V6	-	0.076 6	唐彦东等 ^[4]
		全年降水量(mm)	V7	+	0.006 1	唐彦东等
		全年日照数(h)	V8	-	0.026 9	唐彦东等
	抢险救灾能力	常住人口密度(人/km ²)	V9	+	0.009 6	孟晓静等
		卫生机构床位数(个)	V10	+	0.069 3	孟晓静等
		卫生机构人员数(人)	V11	+	0.079 2	唐彦东等
	监测预警能力	广播综合人口覆盖率(%)	V12	+	0.004 1	胡俊峰等
		电视综合人口覆盖率(%)	V13	+	0.006 0	胡俊峰等
	防洪除涝能力	水库数(个)	V14	+	0.077 1	王伟等
		堤防长度(km)	V15	+	0.159 7	王伟等

等方法明确变量间的函数关系来确定变量的方程式及参数,具体设定见表 2。

表 2 SD 模型指标参数与变量方程

Table 2 SD model indicator parameters and variable equations

序号	方程
1	洪涝减灾力=INTEG(社会基础支持+抢险救灾能力+监测预警能力+防洪除涝能力-承灾体脆弱性,0)
2	社会基础支持=普通高校在校生率*0.269 9+人均地区生产总值*0.106 7+建成区绿化覆盖率*0.000 2+人均可支配收入*0.078 7+人均粮食产量*0.029 8
3	承灾体脆弱性=全年降水量*0.006 1-全年日照数*0.026 9+常住人口密度*0.009 6-公共财政支出*0.076 6
4	抢险救灾能力=卫生机构床位数*0.069 3+卫生机构人员数*0.079 2
5	监测预警能力=广播综合人口覆盖率*0.004 1+电视综合人口覆盖率*0.006 0
6	防洪除涝能力=水库数*0.077 1+堤防长度*0.159 7
7	普通高校在校生率=WITH LOOKUP(Time,([(0,0)-(4 000,10)],(2013,1.52),(2014,1.56),(2015,1.6),(2016,1.64),(2017,1.68),(2018,1.73),(2019,1.8 2),(2020,1.97),(2021,2.09),(2022,2.22),(2023,2.16),(2024,2.19),(2025,2.17),(2026,2.18),(2027,2.18),(2028,2.18),(2029,2.18),(2030,2.18))
8	人均地区生产总值=人均可支配收入*0.000 204+常住人口密度*0.004 75-1.458
9	建成区绿化覆盖率=公共财政支出*0.000 000 416+38.85
10	人均可支配收入=常住人口密度*38.98+10 440.9
11	人均粮食产量=堤防长度*0.000 622+0.369
12	公共财政支出=WITH LOOKUP(Time,([(0,0)-(4 000,6e+006)],(2013,2.773 47e+006),(2014,3.161 57e+006),(2015,3.712 59e+006),(2016,4.130 16e+006),(2017,4.450 88e+006),(2018,4.806 01e+006),(2019,5.170 63e+006),(2020,5.219 59e+006),(2021,5.162 96e+006),(2022,5.50 49e+00 6),(2023,5.333 93e+006),(2024,5.418 42e+006),(2025,5.333 93e+006),(2026,5.398 04e+006),(2027,5.387 36e+006),(2028,5.392 7e+006),(202 9,5.390 03e+006),(2030,5.391 37e+006))
13	全年降水量=WITH LOOKUP(Time,([(0,0)-(4 000,2 000)],(2013,1 259),(2014,1 473),(2015,1 557),(2016,1 612),(2017,1 439),(2018,1 292), (2019,1 451),(2020,1 653),(2021,1 395),(2022,1 234),(2023,1 315),(2024,1 274),(2025,1 294),(2026,1 284),(2027,1 289),(2028,1 287),(2029, 1 288),(2030,1 287))
14	全年日照数=WITH LOOKUP(Time,([(0,0)-(4 000,2 000)],(2013,1 748),(2014,1 324),(2015,1 221),(2016,1 355),(2017,1 383),(2018,1 533), (2019,1 395),(2020,1 256),(2021,1 511),(2022,1 614),(2023,1 563),(2024,1 588),(2025,1 576),(2026,1 582),(2027,1 579),(2028,1 580),(2029, 1 580),(2030,1 580))
15	常住人口密度=普通高校在校生率*55.93+卫生机构人员数*0.002 13+165.4
16	卫生机构床位数=常住人口密度*57.63+12 403.9
17	卫生机构人员数=公共财政支出*0.007 64+3 983.8
18	广播综合人口覆盖率=常住人口密度*0.174+90.17
19	电视综合人口覆盖率=人均地区生产总值*0.113+广播综合人口覆盖率*0.123+86.53
20	水库数=公共财政支出*0.000 028 2+874.6
21	堤防长度=水库数*0.919+503.4

2.3.4 模型检验

(1)历史数据模拟误差检验

研究选择建成区绿化覆盖率、常住人口密度、卫生机构人员数、电视综合人口覆盖率和水库数 5 个变量,对比 2013—2022 年 5 个变量模拟值与实际值之间的相对误差。结果表明,模型与历史数据的拟合程度较好,相对误差基本在 $\pm 10\%$ 以内。根据 LIU X 等^[27]的标准,模型通过了历史值检验。

(2)参数灵敏度检验

研究对模型中的 15 个参数逐年调整 10%^[28],检验模型输出对参数变化的灵敏度。结果表明,15 个参数的灵敏度均值均未超过 0.1,表明系统对各参数的敏感度较低,模型具有稳健性^[29]。

(3)结构稳定性检验

采用积分误差测试法验证模型的结构稳定性,

改变 STEP TIME=1、0.75、0.5、0.125 进行检验^[30],结果表明,随着 STEP TIME 的变化,模型中变量的变化趋势基本一致,符合结构稳定性标准。

3 洪涝减灾力评估结果分析

3.1 静态评价:TOPSIS 法洪涝减灾力现状评估

图 4 的 TOPSIS 分析结果显示了在经济、基础设施和地理因素的综合作用下,2013—2022 年湖南省 14 市(州)洪涝减灾力的时空分异特征。在时间维度上,各市(州)的排名整体相对稳定,长沙市、株洲市、湘潭市、衡阳市常年保持领先。在空间维度上,洪涝减灾力呈现“东高西低”的分布特征,湘东和长株潭城市群经济发展和基础设施较好,减灾力较高;而湘西和湘西北地区由于资源较匮乏和基础设施薄弱,减灾力较低。

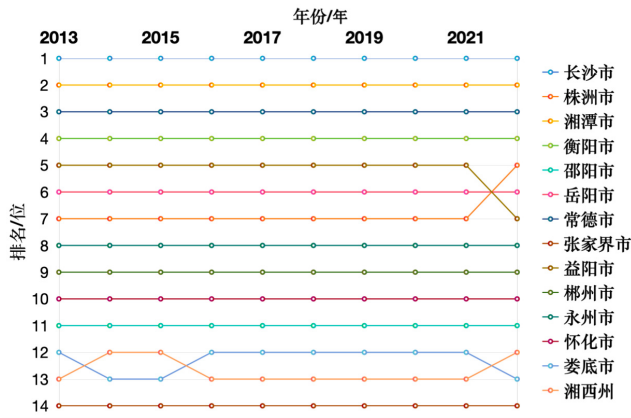


图4 2013—2022年TOPSIS法分析下各市(州)洪涝减灾力排名

Fig.4 Ranking of flood disaster mitigation capabilities among cities (prefectures) using the TOPSIS method from 2013 to 2022

表3 五种情景指标组合与方案设定

Table 3 Five scenario indicator combinations and plan settings

指标	现状延续基准型	经济资源强化型	教育医疗协同型	防洪设施强化型	减灾能力综合型
普通高校在校生率	恒定	恒定	增加 20%	恒定	增加 10%
人均可支配收入	恒定	增加 20%	恒定	恒定	增加 10%
公共财政支出	恒定	增加 20%	增加 20%	增加 20%	增加 20%
卫生机构人员数	恒定	增加 20%	增加 20%	恒定	增加 20%
卫生机构床位数	恒定	增加 20%	增加 20%	恒定	增加 20%
堤防长度	恒定	恒定	恒定	增加 20%	增加 20%
水库数	恒定	恒定	恒定	增加 20%	增加 20%
广播综合人口覆盖率	恒定	恒定	恒定	增加 20%	增加 20%

3.2.2 不同情景下洪涝减灾力指标值模拟结果

选取 2025 年、2027 年和 2030 年 SD 模型仿真结果,研究发现湖南省 14 市(州)在不同情景下的洪涝减灾力具有明显的空间分布规律。长沙市得益于强大的经济基础和应急资源配置,在所有情景中均排名首位;衡阳市、常德市和邵阳市等依托较完善的防灾设施和经济支撑,减灾能力突出但与长沙仍存在差距;张家界市和湘西州因地理位置较偏远、经济基础较薄弱,减灾能力相对较低。值得注意的是,湘潭市虽地处长株潭城市群,具备较好的基础设施条件,但其减灾能力较弱,可能的原因是传统产业主导限制了其灾害应对的效率与韧性。总体来看,各市(州)洪涝减灾力的空间差异揭示了区域经济、基础设施和地理位置对减灾能力的综合作用。

除了现状延续基准情景,其他情景下郴州市都与怀化市排名对调,可能是由于郴州市靠近粤港澳大湾区,经济发展受到外部辐射的带动,在其他四个情景下更容易获得外部资金和资源支持。而怀化市位于湖南西部,交通条件与资源获取能力受限,在依

3.2 动态模拟:多情景洪涝减灾力时空演变

3.2.1 情景设定

根据国家防灾减灾救灾委员会办公室^[31]、国务院“十四五”国家应急体系规划^[32]中“提升抗灾设防水平、强化救援救灾能力、增强全社会防灾减灾意识”的政策要求,结合洪涝减灾力指标体系设定五种模拟情景,具体如表 3 所示。

(1)现状延续基准型:维持当前发展模式,作为基准参照,评估现有洪涝减灾力水平;

(2)经济资源强化型:增加基础设施投资与资源配置,提升区域洪涝防护能力;

(3)教育医疗协同型:加强灾害教育与医疗设施建设,提高减灾韧性;

(4)防洪设施强化型:优化区域防洪设施,增强抗灾能力;

(5)减灾能力综合型:综合经济资源强化型、教育医疗协同型和防洪设施强化型的特点,多策略提升洪涝减灾力。

赖外部资源的情景中减灾能力的提升受到较大制约。再次表明区域经济区位和社会资源配置对减灾能力的重要影响。

3.2.3 不同情景洪涝减灾力时空动态模拟分析

(1)洪涝减灾力划分

基于 SD 模型模拟结果与样本的分布情况,利用 Arc map 中自然断点法将洪涝减灾力划分为 5 个等级:[0,13]为 I 级、(13,25]为 II 级、(25,37]为 III 级、(37,49]为 IV 级、(49,61]为 V 级、(61,151.74]为 VI 级。

(2)洪涝减灾力多情景时空模拟分析

由图 5 可知,在现状延续基准型情景下,模拟期内长沙市洪涝减灾力显著高于其他市(州),由 V 级升为 VI 级,可能归因于长沙市较强的区域协调能力和管理机制。相比之下,洪涝减灾力处于 I 级、II 级和 III 级的市(州)在空间分布特征上呈现由湘东向湘西和湘西北扩散的趋势,反映了区域间减灾力的显著差异。其中,张家界市洪涝减灾力始终低于其他市(州),可能因其地处湘西部相对偏远地区,在

洪涝灾害发生时不能及时获得外部援助和资源支持,导致整体减灾力相对较弱。至模拟末期,除长沙市外,其他市(州)均未达 VI 级,表明在现有发展模式

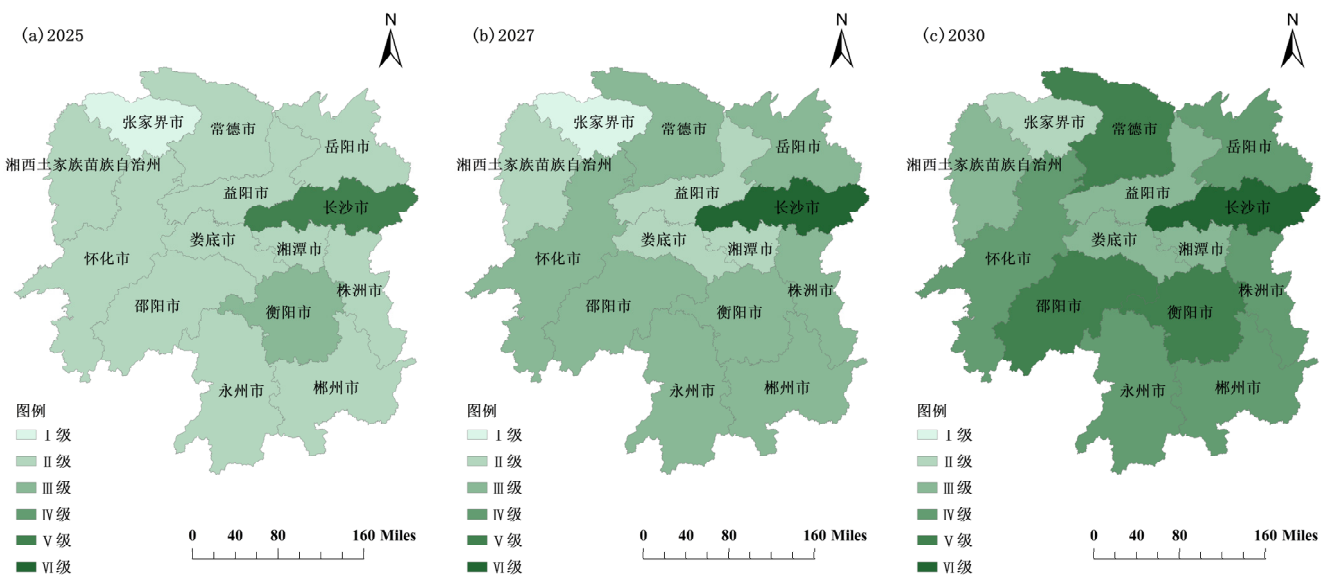


图 5 现状延续基准型情景下湖南省各市(州)洪涝减灾力空间分布

Fig.5 Spatial distribution of flood disaster mitigation capacity in various cities(prefectures)of Hunan Province under the status quo continuation baseline scenario

由图 6 可知,在经济资源强化型情景下,2025 年湖南省各地区洪涝减灾力显著提升,达到 III 级以上的市(州)从基准情景的 2 个增至 5 个,2027 年增加至 10 个,2030 年除张家界市外,其他市(州)均达 III 级以上。其中,常德市、衡阳市和邵阳市的洪涝减灾力增速迅猛,达 VI 级;张家界市虽未突破 III 级,但相较基准情景洪涝减灾力提高了 3.45。在这一情景下,强化的社会经济资源使各市(州)能够更有效地进行灾害防御、应急响应和灾后恢复,进一步表明加强基础设施建设是提升洪涝减灾力的关键。

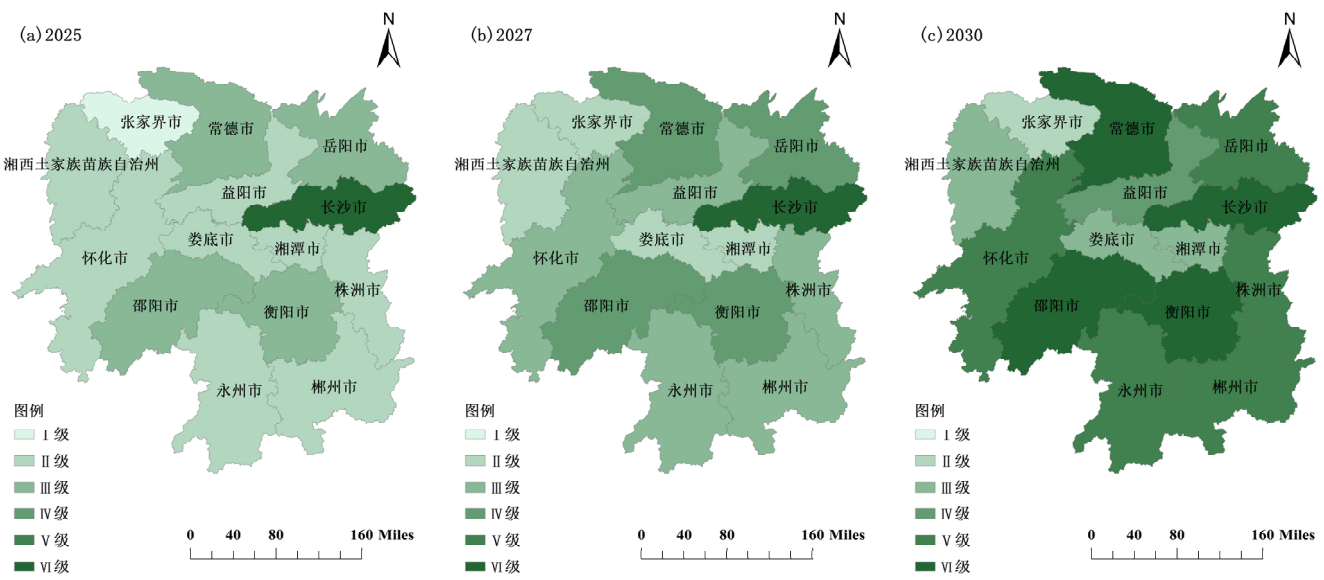


图 6 经济资源强化型情景下湖南省各市(州)洪涝减灾力空间分布

Fig.6 Spatial distribution of flood disaster mitigation capacity in various cities(prefectures)of Hunan Province under an economic resource-intensive scenario

由图 7 可知,在教育医疗协同型情景下,各市(州)洪涝减灾力显著提升。其中,与其他情景相比,衡阳市在教育医疗协同型情景下的洪涝减灾力表现最为优异。衡阳市作为湖南省重要的经济和交通

枢纽,凭借较高的社会发展水平与资源配置能力,能够通过重点强化教育和医疗投入,实现在教育医疗协同型情景下洪涝减灾力的最大提升。教育医疗协同型情景下的洪涝减灾力等级分布与经济资源强

化型较为接近,但由于教育医疗协同型情景在基础设施建设方面作用有限,整体洪涝减灾力在具体数

值上略低于经济资源强化型。

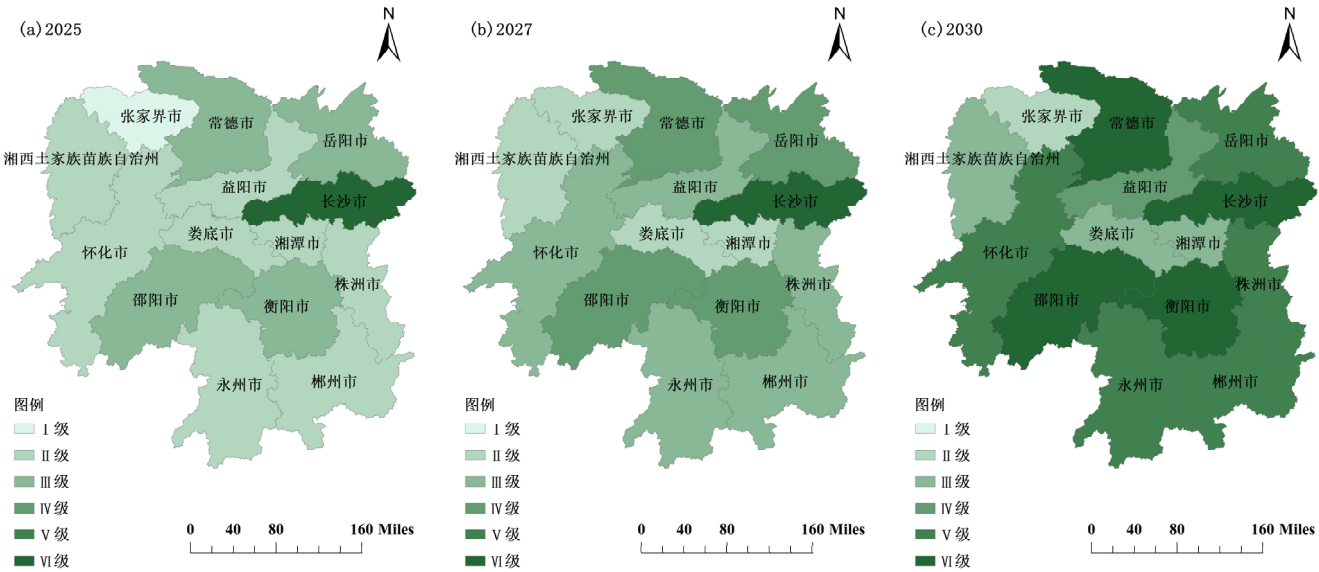


图 7 教育医疗协同型情景下湖南省各市(州)洪涝减灾力空间分布

Fig.7 Spatial distribution of flood disaster mitigation capacity in various cities(prefectures)of Hunan Province in an education-medical collaboration scenario

由图 8 可知,在防洪设施强化型情景下,各市(州)洪涝减灾力均有所提升,但整体增长效率最低。其中,张家界市直到 2030 年才由 I 级提升至 II 级,增速较为缓慢,原因可能是基础防洪设施的建设与

维护周期较长,尤其对于地理相对较偏的张家界市,防洪设施建设面临更大挑战。因此,在经济基础薄弱、基础设施滞后的地区,防洪设施强化型情景的洪涝减灾力提升效果弱于其他情景。

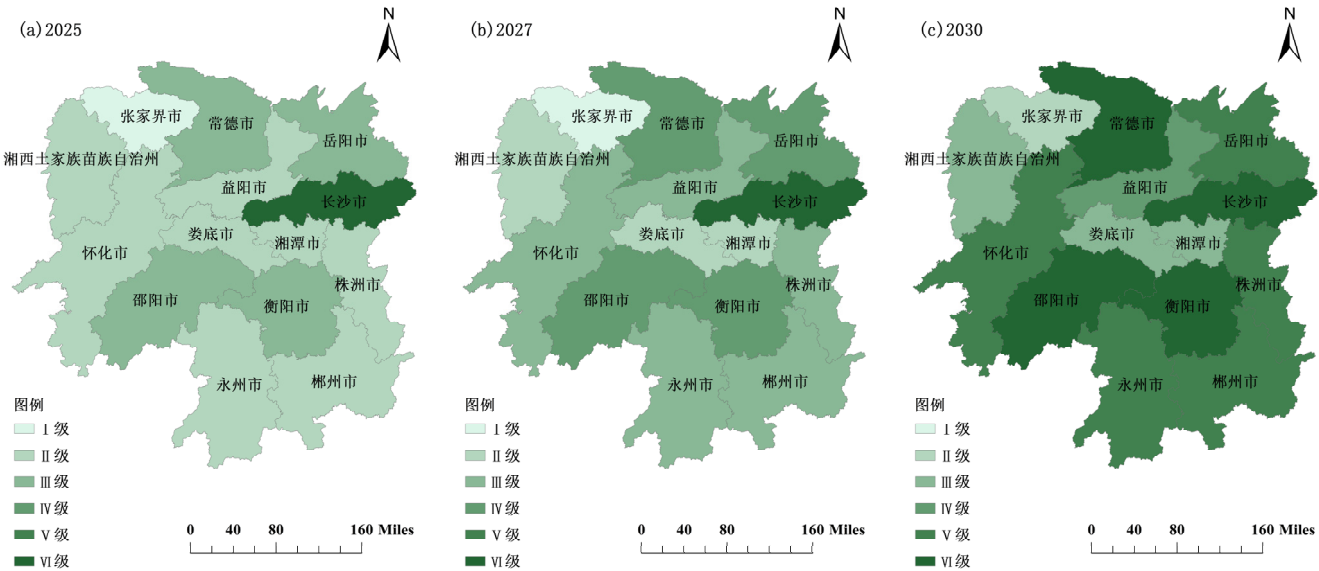


图 8 防洪设施强化型情景下湖南省各市(州)洪涝减灾力空间分布

Fig.8 Spatial distribution of flood disaster mitigation capacity in various cities(prefectures)of Hunan Province under a scenario of enhanced flood control facilities

由图 9 可知,在减灾能力综合型情景下,2025 年至 2030 年多个市(州)的增速与经济资源强化型相近,但发展后劲有所不同。其中,在该情景下的长沙市及湘潭市相较于经济资源强化型,减灾力提升后

劲更强,可能是综合型情景不仅强化了当地经济资源,还促进了教育、医疗等社会领域以及防洪基础设施的协同提升。

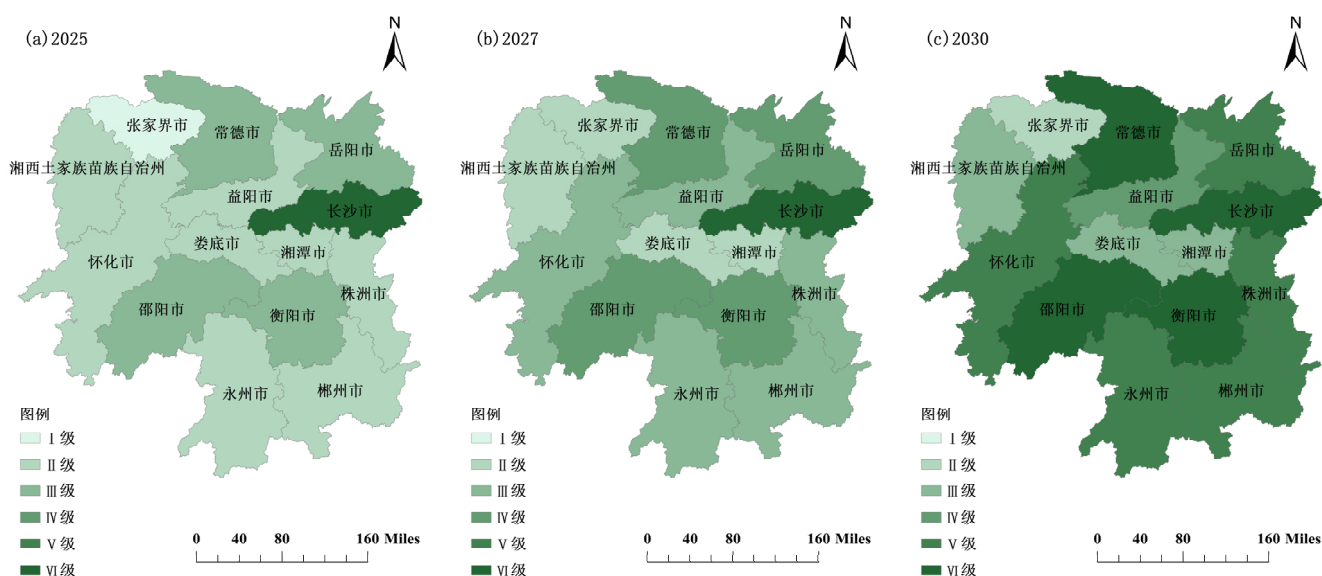


图9 减灾能力综合型情景下湖南省各市(州)洪涝减灾力空间分布

Fig.9 Spatial distribution of flood disaster mitigation capacity in various cities(prefectures)of Hunan Province under a comprehensive disaster mitigation capacity scenario

4 总结与讨论

4.1 总结

研究采用熵权 TOPSIS 法评估湖南省 14 市(州)洪涝减灾力现状,设定五种发展情景进行 SD 模型仿真模拟以及时空分析,最终确定最佳的洪涝减灾力提升策略。

结论如下:

(1)熵权 TOPSIS 静态现状评价:2013—2022 年湖南省洪涝灾害应急减灾能力存在“东高西低”的时空分异特征,时间维度上大部分市(州)的排名保持稳定,且长株潭三市常年领先;空间维度上长株潭城市群和湘东地区因经济实力和基础设施优势表现突出,湘西、湘西北地区因资源与设施不足,减灾能力相对较弱。

(2)动态模拟分析:

a.SD 模型性能。模型历史数据模拟误差基本在 $\pm 10\%$ 以内,15 个参数的灵敏度分析均值未超过 0.1,变量随步长的变化趋势一致,通过了模型性能检验。

b.多情景模拟结果。经济资源强化型与减灾能力综合型情景对洪涝减灾力的提升最为显著,前者对中等发展城市有较强带动作用,后者则适用于经济发展较高且需多维优化的区域;教育医疗协同型情景的效果依赖较强的经济基础;防洪设施强化型情景对减灾能力提升作用有限,难以单独作为策略。各市(州)在不同情景下的表现存在差异,长沙市、湘潭市等在综合型情景下表现最佳;株洲市、邵阳市、岳阳市等在经济资源强化型情景下具有较强提升潜力;张家界市与湘西州在经济资源强化型

与减灾能力综合型情景下的提升效果相似。

c.区域洪涝减灾力提升特征。常德市、邵阳市、衡阳市为高提升型,至 2030 年洪涝减灾力均跃升为 VI 级;长沙市、怀化市等为稳定型,洪涝减灾力持续增加;张家界市、湘西州等为低提升型,洪涝减灾力提升幅度较小,至 2030 年仍未突破 III 级。

(3)TOPSIS 静态评价与 SD 动态模拟结果在空间分布上高度一致:湘东地区表现出较高的洪涝减灾力,湘西和湘西北区域较弱,反映了区域经济基础与资源禀赋对洪涝减灾力的长期影响。

4.2 讨论

针对湖南省各市州面临的洪涝减灾力挑战,研究提出以下建议:

(1)加强洪涝灾害风险区的经济发展与基础设施建设。首先,应根据地理特点和灾害风险规划防洪设施,确保地方政府能够迅速应对洪涝灾害。其次,应健全风险地区交通与通讯设施的预置应急物资储备,优化灾损评估与资源调度流程。最后,应加强区域应急管理联动,推动地方政府建立跨区域应急响应机制,提高灾后恢复的速度和效率。

(2)推动中等经济发展区域的社会资源配置与协同发展。首先,应推动教育、医疗等社会服务资源的整合,提升应急管理与灾害应对的综合能力。其次,应促进区域间的资源共享,以提升跨区域协同应急效能。最后,应增强地方政府的管理能力与政策执行力,保障群众生命财产安全。

(3)促进高提升型区域的经济转型与产业结构优化。首先,应优化现有防洪基础设施,定期评估并升级改造,以提高其应对极端天气的能力。其次,应加强洪涝灾害预警的精准性和应急响应机制的灵

活性,促使防灾体系从风险抵御向韧性增益的跃迁。最后,应提升高提升型城市的灾后恢复和城市韧性建设,积极推进绿色建筑和智能城市技术应用,以更好提升区域减灾效能。

研究存在以下不足:由于各市(州)层级数据的多维性和动态性,全面的指标数据获取存在一定限制,因此研究基于可获得的数据进行指标体系构建及分析,暂未对更小空间尺度或特定区域展开进一步研究。未来研究可结合不同区域的经济水平、地理环境特征及防灾减灾能力,进一步细化空间尺度以拓展研究的深度。

参 考 文 献

- [1] 邓梓锋,高玮志,廖耀星,等.气候变化对城市暴雨洪涝影响研究进展[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(2):1-14.[DENG Z F,GAO W Z,LIAO Y X,et al.Research progress on the impact of climate change on urban rainstorm and flooding[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2024,45(2):1-14.]
- [2] 中华人民共和国应急管理部.2024 年上半年全国自然灾害基本情况[EB/OL].(2024-07-12)[2025-04-04].https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202407/t20240712_494600.shtml. [Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China.Basic situation of natural disasters in China in the first half of 2024[EB/OL].(2024-07-12)[2025-04-04]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202407/t20240712_494600.shtml.]
- [3] 郑德凤,高敏,李钰,等.基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):1-8,22.[ZHENG D F,GAO M,LI Y,et al.Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J].Journal of Hohai University(Natural Science Edition),2022,50(3):1-8,22.]
- [4] 唐彦东,牛紫霄,于汐,等.基于变权理论的河北省洪涝灾害风险评估研究[J].灾害学,2024,39(4):138-147.[TANG Y D,NIU Z X,YU X,et al.Flood disaster risk assessment in Hebei Province based on variable weight theory[J].Journal of Catastrophology, 2024,39(4):138-147.]
- [5] 李娜,吴怀石.考虑洪涝灾害风险的小样本应急避难所选址模型[J].安全与环境学报,2025,25(3):1090-1101.[LI N,WU H S.Few-shot model for identifying emergency shelter locations considering flood disaster risk[J].Journal of Safety and Environment,2025,25(3):1090-1101.]
- [6] 程书波,李冲,刘玉.基于组合赋权的河南省洪涝灾害综合承灾力评价[J].人民黄河,2024,46(7):48-55.[CHENG S B,LI C,LIU Y.Study on comprehensive disaster bearing capacity evaluation of flood disaster in Henan Province based on combination weighting[J].Yellow River,2024,46(7):48-55.]
- [7] 李洁,雷震,辛文鹏.基于格网尺度的中小型城市洪涝灾害风险评估[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(1):78-86.[LI J,LEI Z,XIN W P.Flood disaster risk assessment in small and medium-sized cities based on grid scale[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2025,46(1):78-86.]
- [8] 李继清,李阳,黄可.基于 CRITIC-加权灰色关联分析的年度洪涝灾情评估模型及应用[J].中国农村水利水电,2024(11):21-29.[LI J Q,LI Y,HUANG K. Annual flood disaster assessment model and application based on Critical-weighted grey correlation analysis[J].China Rural Water and HydroPower,2024(11):21-29.]
- [9] 张金萍,李玉达,左其亭,等.城市洪涝应急响应能力评价及优化研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(4):8-15.[ZHANG J P,LI Y D,ZUO Q T,et al.Evaluation and optimization of urban flood emergency response capacity[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2024,45(4):8-15.]
- [10] BHATTARAI R,YOSHIMURA K,SETO S,et al. Statistical model for economic damage from pluvial floods in Japan using rainfall data and socioeconomic parameters[J].Natural Hazards and Earth System Sciences,2016,16(5):1063-1077.
- [11] RINCÓN D,VELANDIA J F,TSANIS I,et al. Stochastic flood risk assessment under climate change scenarios for Toronto,Canada using CAPRA[J].Water,2022,14(2):227.
- [12] SAJJAD A,LU J,CHEN X,et al.Operational monitoring and damage assessment of riverine flood-2014 in the lower Chenab plain, Punjab, Pakistan, using remote sensing and GIS techniques[J].Remote Sensing,2020,12(4):714.
- [13] 田源,马健,岳清瑞,等.基于城市安全“风险源-承灾体-减灾力”理论的 2024 年日本能登半岛地震剖析[J/OL].工程力学,2024[2025-04-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20241202.1442.015.html>. [TIAN Y,MA J,YUE Q R,et al.Analysis of the

- 2024 Noto Peninsula, Japan earthquake based on the "risk source–risk exposure–mitigation force" urban safety theory[J/OL].Engineering Mechanics,2024 [2025-04-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20241202.1442.015.html>.]
- [14] 岳清瑞,陆新征,许镇,等.城市安全“风险源-承灾体-减灾力”理论框架[J/OL].工程力学,2023[2025-04-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20230907.1432.006.html>. [YUE Q R,LU X Z,XU Z,et al.The "risk source–risk exposure– mitigation force" theoretical framework for urban safety[J/OL]. Engineering Mechanics,2023[2025-04-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.o3.20230907.1432.006.html>.]
- [15] 中华人民共和国应急管理部.国家防灾减灾救灾委员会针对湖南提升国家救灾应急响应级别指导做好严重暴雨洪涝灾害救灾救助工作[EB/OL].(2024-07-02)[2025-04-04].<https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt>. [Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. National Committee for disaster Prevention, Mitigation,and Relief issues guidance on enhancing the national disaster relief emergency response level in Hunan Province to effectively address severe flooding and water logging disasters[EB/OL].(2024-07-02)[2025-04-04].<https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt>.]
- [16] 罗源,王瑶,刘炼焯,等.台风“格美”(2403 号)致湘东南极端暴雨成因分析[J].灾害学,2025,40(3):89-94, 123.[LUO Y,WANG Y,LIU L Y,et al.Cause analysis of extreme rainstorm caused by typhoon“Gaemi” (No.2403)in Southeastern Hunan[J].Journal of Catastrophology,2025,40(3):89-94,123.]
- [17] 王飞跃,王籽幻,杨倩,等.新安全观“共同”视角下城市洪涝灾害应急资源配置四方博弈研究[J].灾害学,2025,40(3):26-32,53.[WANG F Y,WANG Z H, YANG Q,et al.Research on the four-party game of emergency resource allocation in urban flood disasters under the common perspective of a new vision of security[J].Journal of Catastrophology,2025, 40(3):26-32,53.]
- [18] 周玉玺,程创业.数字普惠金融与农业产业链韧性耦合协调及影响因素[J].中国农业大学学报,2024,29(7):297-306.[ZHOU Y X,CHENG C Y.Coupling coordination and influencing factors of digital inclusive finance and resilience of agricultural industry chain[J].Journal of China Agricultural University,2024,29(7):297-306.]
- [19] ROGERS P.Development of resilient Australia: enhancing the PPRR approach with anticipation, assessment and registration of risks[J].Australian Journal of Emergency Management(AJEM),2011, 26(1):54-58.
- [20] 周利敏.韧性城市:风险治理及指标建构:兼论国际案例[J].北京行政学院学报,2016(2):13-20.[ZHOU L M.Resilient cities:risk governance and indicator construction:with reference to international cases[J]. Journal of Beijing Administration Institute, 2016(2): 13-20.]
- [21] BAUER R A.Consumer behavior as risk taking[C]// Proceedings of the 43rd National Conference of the American Marketing Association.Chicago Illinois: American Marking Association,1960:389-398.
- [22] 王伟,石雨欣,宋月,等.暴雨-滑坡灾害链应急能力评估:以粤港澳大湾区为例[J].自然灾害学报,2024,33(4):95-105.[WANG W,SHI Y X,SONG Y, et al.Emergency capability assessment of the rainstorm–landslide disaster chain: taking the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area as an example[J].Journal of Natural Disasters,2024, 33(4):95-105.]
- [23] 孟晓静,刘超,曹莹雪,等.基于随机森林优化算法的城市群洪涝灾害韧性时空演变研究[J].防灾减灾工程学报,2024,44(4):784-791.[MENG X J,LIU C,CAO Y X,et al.Study on spatiotemporal evolution of flood disaster resilience in urban agglomeration based on random forest optimization algorithm[J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2024, 44(4):784-791.]
- [24] 胡俊锋,杨月巧,杨佩国.基于减灾能力评价的洪涝灾害综合风险研究[J].资源科学,2014,36(1):94-102. [HU J F,YANG Y Q,YANG P G.Research of comprehensive risk of flood disaster based on disaster reduction ability[J].Resources Science,2014,36(1):94- 102.]
- [25] HWANG C L,YOON K.Methods for multiple attribute decision making[C]//Multiple Attribute Decision Making:Methods and Applications A State-of-the-art Survey.Berlin,Heidelberg:Springer,1981: 58-191.
- [26] 王其藩.系统动力学[M].上海:上海财经大学出版社,2009.[WANG Q F.System Dynamics[M]. Shanghai:Shanghai University of Finance and Economics Press,2009.]
- [27] LIU X,MA S,TIAN J,et al.A system dynamics approach to scenario analysis for urban passenger

- transport energy consumption and CO₂ emissions:a case study of Beijing[J].Energy Policy,2015,85:253-270.
- [28] 顾朝林,管卫华,刘合林.中国城镇化 2050:SD 模型与过程模拟[J].中国科学:地球科学,2017,47(7):818-832.[GU C L,GUAN W H,LIU H L.Chinese urbanization 2050: SD modeling and process simulation[J].Science China Earth Sciences,2017,47(7):818-832.]
- [29] GULISHENG MU A,YANG G,TIAN L ,et al. Analysis of water resource carrying capacity and obstacle factors based on GRA-TOPSIS evaluation method in Manas River Basin[J].Water,2023,15(2): 236.
- [30] 张宁,刘革,张敬文.基于系统动力学的我国社会重大风险仿真研究 [J]. 财 经 理 论 与 实 践,2024,45(1):104-110.[ZHANG N,LIU G,ZHANG J W.Simulation study of major Chinese social risk based on system dynamics[J].The Theory and Practice of Finance and Economics,2024,45(1): 104-110.]
- [31] 中华人民共和国应急管理部.国家防灾减灾救灾委员会办公室关于做好 2024 年全国防灾减灾日有关工作的通知 [EB/OL].(2024-04-01)[2025-04-04].https://www.mem.gov.cn/gk/zfxzgkpt/fdzdgknr/202404/t20240401_483275.shtml. [Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China.Notice from the Office of the National Committee for disaster Prevention,Mitigation,and Relief on doing a good Job in the work related to the 2024 national disaster prevention and mitigation day[EB/OL].(2024-04-01) [2025-04-04].https://www.mem.gov.cn/gk/zfxzgkpt/fdzdgknr/202404/t20240401_483275.shtml.]
- [32] 中华人民共和国中央人民政府.国务院关于印发“十四五”国家应急体系规划的通知[EB/OL].(2022-02-14)[2025-04-04].https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-02/14/content_5673424.htm. [The Central People's Government of the People's Republic of China.Notice of the State Council on issuing the 14th five-year plan for the national emergency response system[EB/OL].(2022-02-14)[2025-04-04].https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-02/14/content_5673424.htm.]

Spatiotemporal Evolution and Multi-Scenario Simulation of Flood Disaster

Mitigation Capacity Based on the Entropy-Weighted TOPSIS–SD Model

LIU Wei¹,CHEN Shuyan¹

(School of Public Administration and Law, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: [Objective] To explore the dynamic evolution patterns of flood disaster mitigation capacity, this study takes 14 cities(prefectures) in Hunan Province as the research area. An evaluation-simulation system integrating the Entropy Weight TOPSIS method and the System Dynamics model was developed to conduct multi-scenario simulation analysis of regional flood disaster mitigation capacity. [Methods] Based on the evaluation index system for flood disaster mitigation capacity, the Entropy Weight TOPSIS method was employed to assess the current status of flood disaster mitigation capacity in the 14 cities (prefectures) of Hunan Province. Subsequently, the System Dynamics model was utilized to simulate the spatio-temporal evolution trends of flood disaster mitigation capacity under five development scenarios: Baseline Scenario, Economic Resource Enhancement Scenario, Education-Healthcare Synergy Scenario, Flood Control Infrastructure Enhancement Scenario and Comprehensive Mitigation Capability Enhancement Scenario. [Results] ① The TOPSIS evaluation and SD model simulation results exhibit high spatial consistency: flood disaster mitigation capacity is generally stronger in eastern Hunan, whereas it is relatively weaker in western and northwestern Hunan. ② The growth types of flood disaster mitigation capacity among the 14 cities (prefectures) can be categorized as High-Increase Type, Stable Type, and Low-Increase Type. ③ The simulation effectiveness under different scenarios demonstrates regional adaptability: The Economic Resource Enhancement Scenario is suitable for regions with low-to-moderate economic development; the Comprehensive Mitigation Capability Enhancement Scenario applies to regions with higher economic levels but singular structures; the Education-Healthcare Synergy Scenario yields significant results in regions with a solid economic foundation; the Flood Control Infrastructure Enhancement Scenario offers limited improvement effects and is difficult to implement

independently as a strategy for enhancing flood disaster mitigation capacity. [**Conclusion**] Significant regional disparities exist in flood disaster mitigation capacity. Mitigation strategies should be tailored according to regional characteristics. Furthermore, adopting comprehensive strategies is crucial for enhancing the overall regional disaster mitigation level.

Keywords: flood disaster; disaster reduction force; entropy weight TOPSIS-SD; spatio-temporal dynamic simulation; multi-scenario analysis