

韩金, 戴尔阜. 基于系统动力学的台风减灾决策研究[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 220–227, 234. [HAN Jin and DAI Erfu. System-dynamics-based Disaster Reduction Decision for Typhoon Disaster[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 220–227, 234. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.02.038.]

基于系统动力学的台风减灾决策研究^{*}

韩 金^{1,2,3}, 戴尔阜^{4,5}

- (1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室拉萨高原生态系统研究站, 北京 100101; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 台风破坏性巨大, 易与暴雨、洪涝、风暴潮灾害发生碰头现象, 严重威胁沿海地区人民的生命和财产安全。因此, 台风减灾决策研究对于保护人民生命财产安全至关重要。该文基于系统动力学和多灾种灾害建立防灾减灾模型, 包括物资人员调度子块、信息传递子块、灾害系统子块。以海南省海口市台风灾情及政府防灾减灾工作为例进行数值模拟, 仿真结果表明: 政府资源调度能力越高, 城市应急能力达到峰值速率越快; 受预警等级及应急能力的影响, 信息热度迅速上升至峰值, 之后缓慢下降; 对建筑物与电力系统进行抗灾加固, 降低其脆弱性, 提高水库堤坝及交通防灾减灾工作人员配比可以在很大程度上减缓灾情。该模型能为政府制定防灾减灾策略提供理论依据。

关键词: 系统动力学; 台风灾害; 城市防灾减灾决策; 资源调度

中图分类号: P642; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)02–0220–09

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.02.038

海南省地处我国的南海海域, 是典型的台风灾害影响区域, 其台风活动具有频数多、强度大、活动时间长的特点, 往往伴随多种次生灾害发生, 救灾难度巨大, 严重威胁人民生命财产安全。进行台风多灾种灾害的防灾减灾措施研究, 对加强区域防灾抗灾能力, 降低灾后救灾难度具有重大意义。

近年来国内外学者对台风灾害的研究主要包括: 灾害特征分析和灾害应急救援研究。灾害特征分析认为大多数灾难是由同时或连续的多重灾害引发的, 了解危害链的发生、发展、转化及其规律, 定量评估台风等级和实现台风灾害风险分区有助于采取相应的措施减少台风灾害潜在的损失^[1–2]。KIM 等利用 1977–2014 年间 91 个台风的路径、强度和降雨量数据, 建立了预测朝鲜半岛台风引起的累积降雨统计模型^[3]。裘江南等通过台风“罗莎”提出了预测突发事件的贝叶斯网络模型, 对灾害损失后果进行预测^[4]。TAJIMA 等通过调查超级台风“莫兰蒂”在沿海不同地区的风暴潮和海浪等灾害影响, 得出灾害演化规律^[5]。薛根元等分析了浙江台风历史灾害数据, 得出台风灾害伴有强降水、洪涝、地质灾害等特点^[6]。李倩等根据 1974–2015 年京津冀地区的历史台风资料及降水数据, 基于 Gumbel 对台风风险性进行评估^[7]。邬群勇等分析台风“莫兰蒂”和“鲇鱼”期间

福建省微博数据, 得出灾情的空间分布情况^[8]。

灾害应急救援研究是在灾情分析的基础上, 采取相应防范措施, 研究城市应急策略对应急能力的影响, 以此大幅度提升区域的灾害风险防范和综合适应能力^[9–11]。LIN 等研究了 22 个台风的应急部门应急保障需求, 建立了多元线性回归时间序列模型, 分析台风的潜在影响^[12]。张斌等通过统计历史台风数据, 分析成灾因子、孕灾环境等, 基于精细网格提出了台风灾损模型及应急物资预测模型^[13]。孙少文等通过对不同强度台风灾害分析, 建立城市应急弹性模型, 研究了城市应急策略对应急能力和应急弹性的影响^[14]。QIN 等以 2014 年台风威马逊和 2016 年台风 Mirinae 期间海南省文昌市的疏散过程为例, 采用粒子群算法建立了应急避难场所选址模型^[15]。

目前, 针对台风灾害的研究多集中在台风特征及影响因素、灾害应急管理及预测等方面, 对台风防灾减灾策略的研究还偏向理论层面。台风灾害具有结构复杂, 突发性高等特点, 系统动力学在定性研究与定量研究复杂系统方面具有其独特的优势, 因此可以通过该方法来研究台风风险防范策略问题。近年来系统动力学在突发事件的研究主要集中在物资运输、舆情扩散、灾损情况、灾害急救等方面。李健等探究影响物资调运速度的

^{*} 收稿日期: 2020–09–14 修回日期: 2020–12–21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1508805); 兰州交通大学优秀平台项目(201806)

第一作者简介: 韩金(1996–), 男, 汉族, 山西太原人, 硕士研究生, 主要从事灾害风险防范研究。E-mail: hanjin6236@qq.com

通讯作者: 戴尔阜(1972–), 男, 汉族, 甘肃平凉人, 博士, 研究员, 主要从事土地利用与气候变化及灾害风险评估研究。

E-mail: daief@igsrr.ac.cn

主要原因,建立物资运输模型,进行物资调运仿真^[16]。余乐安等构建了水污染突发事件中网络舆情的扩散模型,探究各传播要素之间的关系^[17]。邓建高等以“江苏响水爆炸事故”为例,探究突发事件的网络舆情传播规律,得到舆情变化情况^[18]。陆秋琴提出了地下商业空间应急救援模型,对灾害突发的真实救援进行仿真^[19]。EDWIN 等针对雅加达的洪涝问题,建立系统动力学模型探究雅加达城市发展与水文地貌之间的动态复杂关系^[20]。于小兵等以 2013 年台风“菲特”造成的浙江余姚水灾为例,构建了多目标动力学模型模拟市民恐慌程度及灾害损失率^[21]。

然而,基于系统动力学的灾害防范多围绕单一灾种的应急救援措施,对于多灾种防灾减灾方面的战略部署决策缺少研究。本文基于系统动力学建立了台风防灾减灾因果回路图及存量流量图,并结合台风灾害特点,模拟分析台风灾害期间的物资人员调配方案,信息传播政策,及台风、暴雨、洪涝、风暴潮灾害碰头现象的防灾减灾措施。与突发公共安全事件及单一灾种灾害相比,建立多灾种灾害叠加的系统动力学模型能为政府部门制定台风防灾减灾最优策略提供技术支持。

1 台风灾害系统动力学模型构建

1.1 因果回路图构建

系统模型的因果关系可利用 Vensim 软件通过确立各变量与常量之间逻辑关系的方式建立。将各参数变量之间的数量关系以方程式的形式写入模型便可进行数值仿真模拟。系统动力学主要用于信息反馈系统领域,是一种针对结构功能的数值仿真模拟,适用于研究复杂系统之间的动态关系^[22]。大部分自然灾害是由多个致灾因子共同作用的结果,单一致灾因子难以全面表征灾害的危险程度^[23]。台风的主要灾害类型包括大风、暴雨、洪涝、风暴潮等等^[24]。大风,暴雨是台风破坏性较为重大的致灾因素,其带来的洪水及风暴潮则会进一步加剧城市的受灾程度,造成重大损失^[25]。灾情发生前期,政府部门根据灾情预测情况实施防灾减灾部署策略,进行物资与应急人员的调配,同时会发布信息预警,提醒居民及相关人员进行紧急避难或采取必要的防御措施,快速进行防灾减灾工作。防灾减灾因果回路图如图 1 所示。

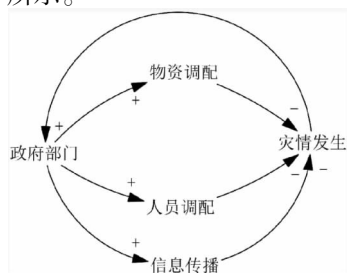


图 1 防灾减灾因果回路图

1.1.1 物资人员调度因果回路图

台风灾害发生前,往往需要大量防灾减灾人员进行隐患巡视监测、风险筛查等工作,储备防灾物资以减小致灾隐患威胁。若人员及物资的需求过大,现有储备不足,将会产生需求缺口,为弥补资源短缺情况,政府部门需要紧急调度减灾人员及物资。在调运过程中,政府的应急资源

调度能力起到了非常重要的作用,影响着应急调度的各个环节。调度能力越强,则调度及运输时间越短,可以快速集结各方人员物资。随着防灾人员不断到达进行工作,应急物资库存增多并开始投入使用,需求则会逐渐减小,缩小物资人员缺口。与人员的调度使用情况不同,减灾物资调度完成后,会马上投入使用,存在一次性使用情况,在灾害发生前期及灾害中期库存量先增后减,使用量逐步增加,故物资总量为库存与使用量之和,而人员不存在一次作业的情况,大多是多次进行防灾减灾工作,因此到位人数数目即为防灾人员总数。物资人员调度因果回路图如图2所示。

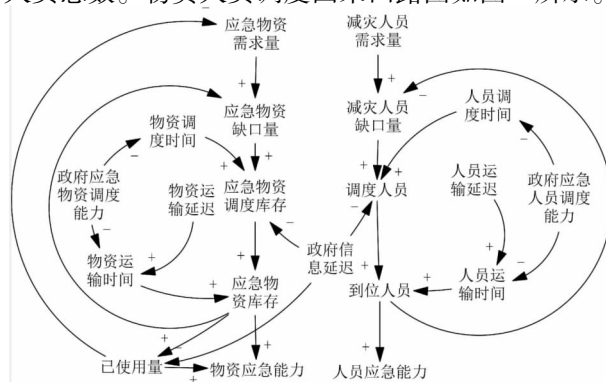


图2 物资人员调度因果回路图

1.1.2 信息传播因果回路图

信息传播贯穿灾害发生的整个过程, 其中信息热度的发展、成熟、沉寂存在一定的规律。首先灾害事件的预警等级及政府的应急能力决定了灾害的影响力, 其又直接影响了官方媒体和网络媒体对此事件的关注度。因网络媒体在传播新闻过程中经常会存在虚假新闻, 政府部门需对网络媒体进行审查辟谣, 减少部分新闻的传播效应。在网络媒体和官方媒体的双重作用下, 信息得以广泛传播, 产生当前的信息热度, 信息热度的增加又会加剧新闻量的产生, 同时旧新闻也会随时间推移慢慢沉寂失去热度^[26]。信息传播因果回路图如图3所示。

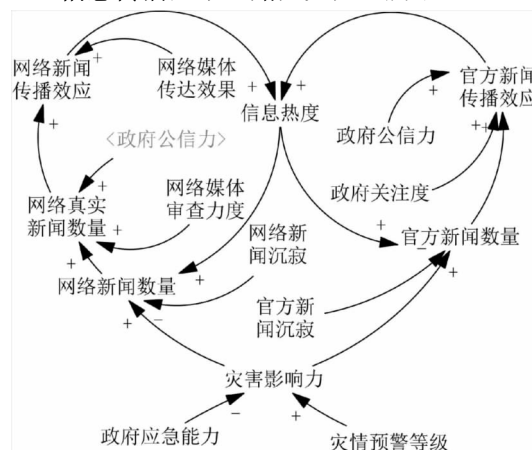


图3 信息传播因果回路图

1.1.3 灾害系统因果回路图

台风灾害的发生往往伴随暴雨、洪涝、风暴潮等灾害^[27]。各个灾种对城市的损害均不相同,由于灾害碰头效应,单灾种灾害之间互相叠加,加大了对城市的影响。因城市基础设施较为繁杂,本文仅考虑四种灾害碰头对电力设施、建筑物、水库堤坝、交通线路的损坏情况。台风的主要致

灾因子为大风,对电力系统,建筑物,及交通出行均有不同程度的损害^[28-29]。暴雨的主要致灾因子为降雨量,降雨强度^[30]。其易毁坏电力系统、冲刷建筑物与水库堤坝、阻碍交通出行。洪涝容易浸泡电力设施,淹没城市建筑,损毁水库,造成堤坝溃堤,阻断交通线路^[31]。风暴潮多对海边建筑物、海堤、及交通造成影响^[32]。台风灾害应急管理机制,是由政府相关职能部门统一进行管理、协调,通过层级分配形成的^[33]。由于灾情的复杂性与不确定性,需要专门的工作人员进行防灾减灾工作,小范围的减灾任务在当地人力资源充足时前期安全隐患可以自行排除,但涉及大范围的台风灾害,往往需要调动多方力量协调作业,共同完成减灾工作。本文选用人员调度因果回路图中的到位人员进行减灾人员的防灾减灾模拟。灾害系统因果回路图如图4所示。

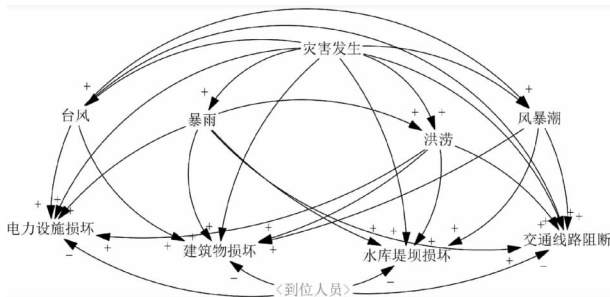


图4 灾害系统因果回路图

1.2 存量流量图

因果回路图一定程度上仅是对台风防灾减灾工作的内在机理进行简单说明,没有对变量之间的关系进行动态的定量化描述,未表现出变量间相互作用的结果,为仿真其数量关系,可利用 vensim 软件建立相应的动力学方程,通过系统反馈与控制,模拟实时变化情况。台风灾害的登陆期一般为1~2 d,但强降雨一般在台风登陆前就已经开始,故时间上选取台风登陆前5 d进行模拟,总共选择10 d^[34]。在灾害达到应急预案条件后,政府部门将采取必要的措施进行防灾减灾工作^[35]。依据因果回路图建立的系统动力学模型存量流量图如下,物资人员调度模型如图5所示,信息传播模型如图6所示,灾害系统模型如图7所示。模型主要变量如表1所示。

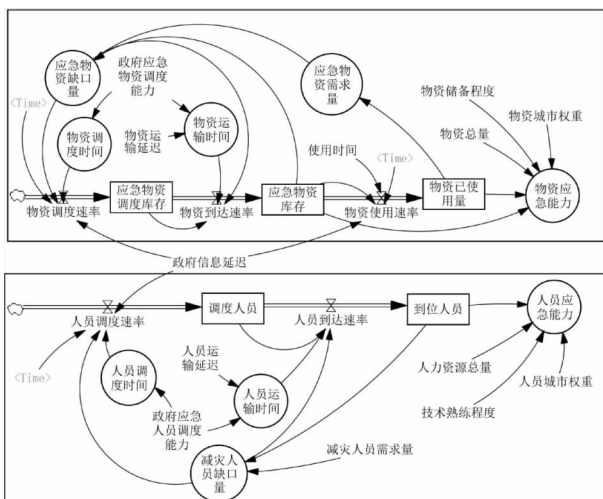


图5 物资人员调度模型存量流量图

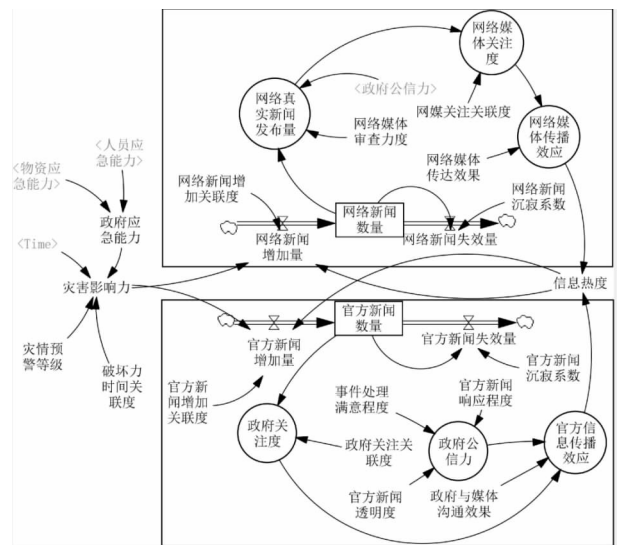


图6 信息传播模型存量流量图

城市应急弹性模型可反应城市应急能力的变化情况,使用此模型来衡量城市的物资应急能力及人员应急能力,利用公式(1)对城市应急能力进行定性分析。

$$f_t = \alpha \sum_{i=1}^m \omega_i \frac{r_{it}}{R_i}, (0 < \alpha < 1, 0 < \omega_i < 1). \quad (1)$$

式中: f_t 表示在 t 时刻的城市应急能力, α 指物资或人员在城市防灾减灾过程中的权重, ω_i 指物资储备匹配程度或人员的技术熟练程度, R_i 表示物资或救灾人员的需求总数, r_{it} 表示 t 时刻可以调度的资源数量。通过上述物资库存及到位人员数量,可得到物资或人员应急能力的实时变化值,以此来衡量城市的抗灾能力^[14]。

2 实证研究

2.1 案例背景

本文以2011年强台风“纳沙”对海口市的影响为例。9月28-30日,受到“纳沙”的影响,海南岛出现强风雨天气过程,陆地风力普遍达到8级以上,有163个乡镇自动站雨量超过200 mm^[37]。共有322.4万人受灾,倒塌房屋0.2万间,直接经济损失67.7亿元^[38]。海口市共有四个区23个镇、18个街道受灾,受灾面100%,倒塌房屋165间,紧急转移受灾人口16232人次。9月28日至10月7日,全省部队参与抢险救援98起,出动车辆187辆次,出动警力1607人次,解救被困人员1093人,疏散转移群众4451人,抢救财产价值1.61亿元。本文选取9月24日至10月3日共10 d的降雨及风速信息,进行灾情模拟,通过文献调研及对台风、暴雨、洪涝、风暴潮灾害演化过程分析,设定系统动力学模型中的各类参数,各参数之间的数量关系以方程形式进行计算,其中降雨影响因子及风速影响因子根据历史气象数据进行等级划分赋值,灾害因子表示灾害发生的可能性,关联度作用主要为调节单位量纲及重要性赋值,相关数据可通过灾害统计数据等分析等方式得出。

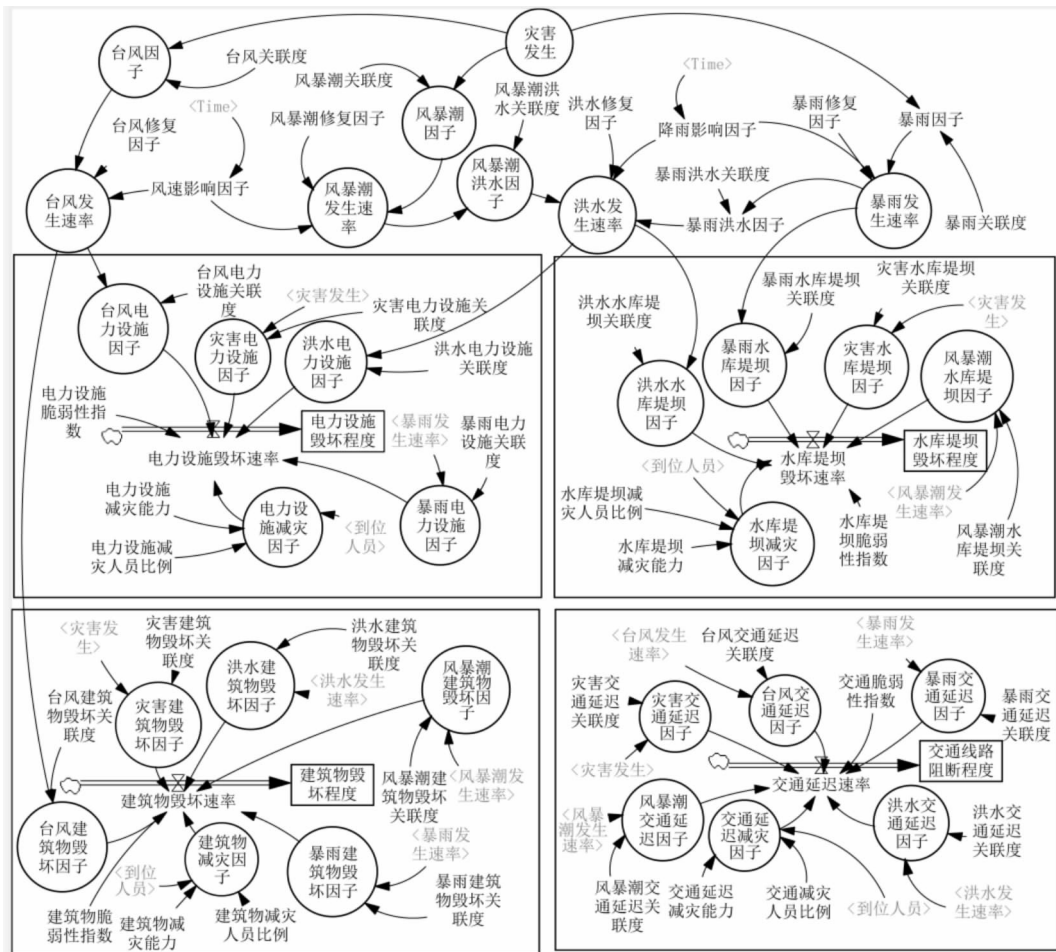


图7 灾害系统模型存量流量图

表1 防灾减灾模型主要变量表达式

变量名	类型	计算方程	单位
应急物资调度库存	状态	INTEG (物资调度速率 - 物资到达速率, 0)	袋
应急物资库存	状态	INTEG (物资到达速率 - 物资使用速率, 5000)	袋
调度人员	状态	INTEG (人员调度速率 - 人员到达速率, 0)	人
到位人员	状态	INTEG (人员到达速率, 1000)	人
网络新闻数量	状态	INTEG (网络新闻增加量 - 网络新闻失效量, 30)	条
官方新闻数量	状态	INTEG (官方新闻增加量 - 官方新闻失效量, 30)	条
物资调度速率	速率	IF THEN ELSE(Time > = 政府信息延迟; OR: Time < = 政府信息延迟 + 物资调度时间, 应急物资缺口量/物资调度时间, 0)	袋/d
物资到达速率	速率	IF THEN ELSE(应急物资缺口量 > 0, 应急物资调度库存/物资运输时间, 0)	袋/d
人员调度速率	速率	IF THEN ELSE(Time > = 政府信息延迟; OR: Time < = 政府信息延迟 + 人员调度时间, 营救人员缺口量/人员调度时间, 0)	人/d
人员到达速率	速率	IF THEN ELSE(营救人员缺口量 > 0, 调度人员/人员运输时间, 0)	人/d
电力设施毁坏速率	速率	MAX((暴雨电力设施因子 + 洪水电力设施因子 + 灾害电力设施因子 + 台风电力设施因子) * EXP(电力设施脆弱性指数) - 电力设施减灾因子, 0) ^[36]	处/d
建筑物毁坏速率	速率	MAX((灾害建筑物毁坏因子 + 暴雨建筑物毁坏因子 + 洪水建筑物毁坏因子 + 台风建筑物毁坏因子 + 风暴潮建筑物毁坏因子) * EXP(建筑物脆弱性指数) - 建筑物减灾因子, 0)	处/d
水库堤坝毁坏速率	速率	MAX((暴雨水库堤坝因子 + 洪水水库堤坝因子 + 灾害水库堤坝因子 + 风暴潮水库堤坝因子) * EXP(水库堤坝脆弱性指数) - 水库堤坝减灾因子, 0)	处/d
交通延迟速率	速率	MAX((暴雨交通延迟因子 + 洪水交通延迟因子 + 灾害交通延迟因子 + 台风交通延迟因子 + 风暴潮交通延迟因子) * EXP(交通脆弱性指数) - 交通延迟减灾因子, 0)	处/d

续表 1

变量名	类型	计算方程	单位
物资应急能力	辅助	物资储备程度 * 物资城市权重 * (物资已使用量 + 应急物资库存) / 物资总量	Dmnl
人员应急能力	辅助	人员城市权重 * 技术熟练程度 * 到位人员 / 人力资源总量	Dmnl
信息热度	辅助	MAX(官方信息传播效应 * 0.5 + 网络媒体传播效应 * 0.5, 0)	Dmnl
灾害影响力	辅助	10 * 突发事件预警等级 * EXP(破坏力时间关联度 * Time ² * 10 * 政府应急能力)	Dmnl
风速影响因子	辅助	WITH LOOKUP (Time, ([(0, 0) - (10, 1)], (0, 0), (1, 0), (2, 0), (3, 0), (4, 0), (5, 0.2), (6, 0.8), (7, 0), (8, 0), (9, 0), (10, 0)))	Dmnl
降雨影响因子	辅助	WITH LOOKUP (Time, ([(0, 0) - (10, 1)], (0, 0), (1, 0), (2, 0.2), (3, 0.4), (4, 0.4), (5, 0), (6, 0.6), (7, 0), (8, 0), (9, 0), (10, 0.2)))	Dmnl

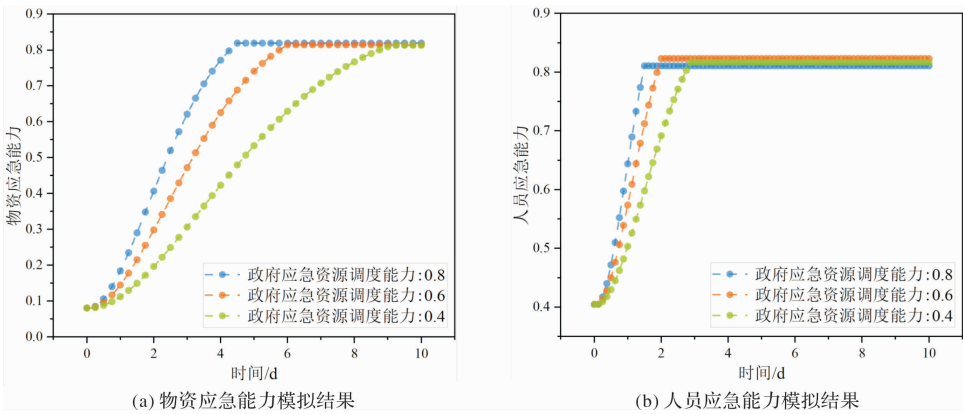


图8 政府应急能力

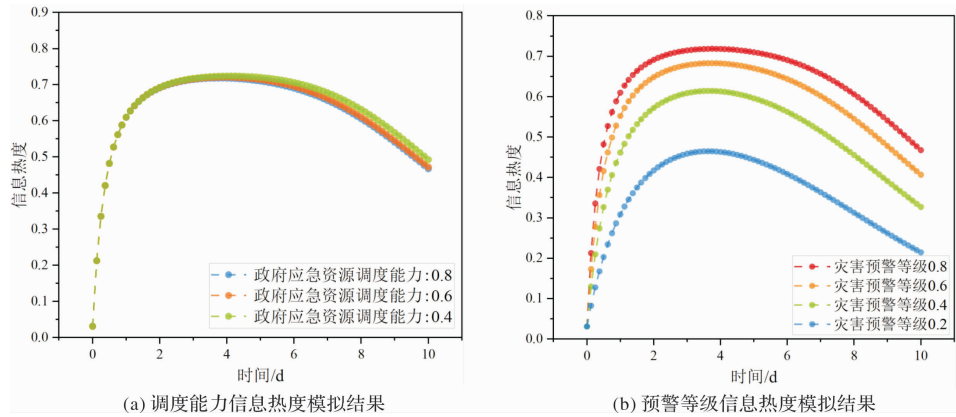


图9 信息热度

2.2 模拟结果分析

2.2.1 资源应急能力

台风救援物资的种类多样,包括医疗资源、防护装备、生活必需品、应急装备、减灾装备等等,可面向防灾减灾也可面向灾民营救。救援人员所在职责包括基础任务、预防任务、保护任务、响应任务以及恢复任务等等^[39]。本文设定所需物资为50 000袋沙袋,作用于堤坝的防护及防洪工作,不存在物资重复使用性。所需人员设定为2 000人,承担灾害预防和排除危险源等防灾减灾任务,不考虑灾情恢复重建及受灾后的灾民救援工作。政府应急物资及人员调度能力取值,可影

响到物资或人员的调度时间及运输时间。调度能力越强,调度及运输时间越短。在调度能力分别为0.8、0.6、0.4时,政府应急能力的仿真模拟结果如图8所示。

政府应急资源调度能力为0.8、0.6、0.4时,物资调度分别需要2 d、2.6 d、4 d,运输需要1.25 d、1.58 d、2.25 d;人员调度分别需要0.62 d、0.83 d、1.25 d,运输需要0.81 d、0.91 d及1.12 d,模型模拟可得城市应急能力实时变化情况,台风在9月29日即系统中第6 d在海口市登陆,政府部门需确保在台风到来之前城市应急能力达到峰值,便于人员开始进行防灾减灾工作,物

资开始使用。由图 8a 可以看出, 当调度能力较弱, 为 0.4 时, 存在灾害碰头现象发生时防灾物资还未到位的情况, 减灾物资不到位会增大堤坝溃堤及城市洪涝风险。图 8b 所示调度能力 0.4 时, 第 3 d 人员应急能力达到峰值但速率较慢, 会加大防灾减灾工作难度。政府部门需考虑物资人员的调度运输实际情况, 分析灾害带来的巨大风险, 选择适合的区域进行资源调度准备及运输, 避免造成资源备而不到的情况, 影响之后的防灾减灾工作。

2.2.2 信息热度

在灾害预警及政府应急能力水平的双重作用下, 灾害事件新闻热度上升。本系统中灾情预警等级设定为 0.8、0.6、0.4、0.2, 对应红色、橙色、黄色、蓝色预警。强台风“纳沙”在登陆前已变为红色预警, 选取灾害预警等级 0.8 进行信息传播模拟, 在 2.2.1 得出政府应急能力水平的基础上, 模拟可得信息热度曲线如图 9 所示。图 9a 可以看出, 信息热度受政府应急资源调度能力影响较为轻微, 不同调度能力下信息热度浮动较小, 在调度能力达到 0.8 时政府应急能力增高, 热度与其余调度能力相比略微下降。图 9b 表明, 信息热度受到灾害预警等级的影响较大, 预警等级较高时信息热度居高不下, 且持续时间较长, 较低等级预警带来热度较小, 并且迅速下降, 媒体重视程度不高。依据不同灾情信息, 媒体需在一定程度上引导民众对事件的关注角度和关注程度^[40], 根据信息热度涨幅情况, 热度过高时居民基本都已知晓灾情信息, 则可将信息发布内容侧重于防灾减灾工作情况, 以安抚群众的恐慌心理, 在危险性较高, 热度较低时可将重点放于灾害信息普及, 强调灾情的危险性, 提高人民的重视程度。

2.2.3 脆弱性指数

脆弱性指数指承灾体在灾害过程中的脆弱性等级, 由载体在灾害中的抗灾能力来决定, 脆弱性指数越小, 抗灾能力越强^[41]。在本系统模型中, 涉及脆弱性指数的载体有电力系统, 水库堤坝, 建筑物, 道路。选取脆弱性指数 4、3、2 对建筑物毁坏速率及毁坏程度进行仿真模拟。

图 10a 表示建筑物毁坏速率在脆弱性指数不同的情况下随时间变化情况, 在第 1~5 d 建筑物主要受到强降雨及洪水的影响, 毁坏速率较低, 第 6 d 台风、暴雨、洪涝、风暴潮碰头后建筑物毁坏速率急剧上升, 6 d 后灾害影响逐渐减少, 毁坏速率逐步趋于 0。图 10b 表示建筑物毁坏程度在脆弱性指数不同的情况下随时间变化趋势, 模拟中不考虑恢复重建情况。前期毁坏程度较为缓慢, 灾害碰头后毁坏程度增加, 达到峰值。当脆弱性指数为 4 时极易受损, 小范围降雨就已产生损坏情况, 而脆弱性指数为 2 时, 台风登陆前毁坏程度基本趋于 0, 登陆后与脆弱性指数为 4 时相比, 毁坏程度大大减小。脆弱性指数在建筑物上可由建筑结构, 建筑材料, 建筑周边环境等方面体现^[42], 加强基础设施的抗灾能力建设可在很大程度上减小灾害的影响。

2.2.4 人员分配方案

台风、暴雨、洪涝、风暴潮分别对城市存在不同程度的破坏, 为减少城市破坏程度, 政府部门需在灾害发生前期进行防灾减灾工作, 保证在人员有限且工作量巨大的情况下, 合理的分配人力资源, 以达到减灾效率最大化。本系统利用物资人员调度子块中的到位人员对电力系统、建筑物、水库堤坝、道路交通四种载体进行防灾减灾工作模拟。共选取五种人员分配方案, 方案(I): 人员均匀分配, 四种承灾体人员配比为 1: 1: 1: 1; 方案(II): 电力系统人员分配增加, 人员配比为 2: 1: 1: 1; 方案(III): 建筑物人员分配增加, 人员配比为 1: 2: 1: 1; 方案(IV): 水库堤坝人员分配增加, 人员配比为 1: 1: 2: 1; 方案(V): 道路人员分配增加, 人员配比为 1: 1: 1: 2。将五种分配方案与无人工作下的受灾情况进行对比, 以四种载体的毁坏程度降幅反映防灾减灾能力的强弱。仿真结果如图 11 所示。图 11a 为仿真模拟四类承灾体毁坏程度的归一化结果。在灾害碰头前期受到暴雨及洪涝的影响, 水库堤坝较易受到损害, 交通线路次之, 二者毁坏程度与建筑物及电力设施相比较为严重。台风登陆后受灾情况加重, 四类承灾体毁坏速率加快, 损失巨大, 在第 6 d 之后逐步趋向持平, 达到最高点。图 11b 表示方案(I): 人员平均分配的模拟结果, 受到灾害风险程度, 防灾减灾人员数量及工作难度的影响, 方案(I)与无人工作情况下进行对比, 毁坏程度降幅大小交通线路 > 水库堤坝 > 电力设施 > 建筑物。图 11c 至图 11f 中, 分别对四类承灾体的防灾减灾人员增多一倍进行防灾减灾模拟。方案(IV)与方案(V)水库堤坝及交通线路人员增多情况下, 第 6 d 灾害碰头前毁坏程度降幅变为 1, 表明已排除灾害风险。方案(II)与方案(III)电力系统与建筑物在人员增多情况下二者毁坏程度也存在一定降幅, 但无法规避灾害风险。在政府启动应急响应后, 工作人员会加强区域内巡视, 确保所属管辖范围内的排水、绿化、道路及附属设施运行安全, 对沿线道路的行道树、排水进水口进行排查, 修剪沿路树枝、清理排水系统、加固加高电力设施、加固水库堤坝等等, 一旦发现隐患立刻排除, 减小灾害发生概率。其中道路、水库堤坝因为其重要性及风险排查措施的有效性, 可以及时发现隐患并通过多项措施减少灾害致灾程度, 而建筑物与电力系统在实际工作中, 排查隐患难度较高, 受所在城区分布密度及技术水平影响较大, 在灾情较弱情况下基本不易损毁, 灾情较重时损毁通常带有突发性, 二者更偏向于灾后恢复重建及灾中应急抢修方面, 防灾减灾期间工作量较弱, 故可根据实际灾情在人力有限情况下减小应急人员数量, 将剩余人员分配给其余承灾体的防灾减灾工作中, 达到资源合理分配的目的^[43]。建筑物及电力系统等设施则可通过改变结构, 更改使用材料等措施, 提高其抗灾性能, 降低其脆弱性指数, 减小灾害发生隐患。

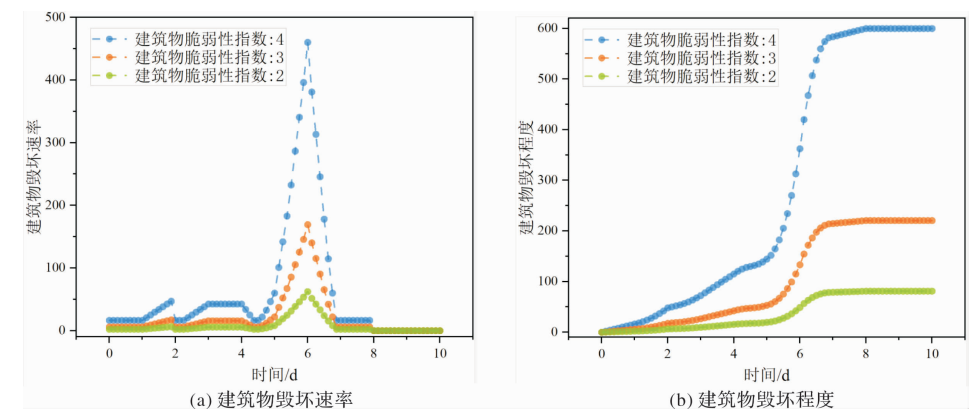


图 10 脆弱性指数

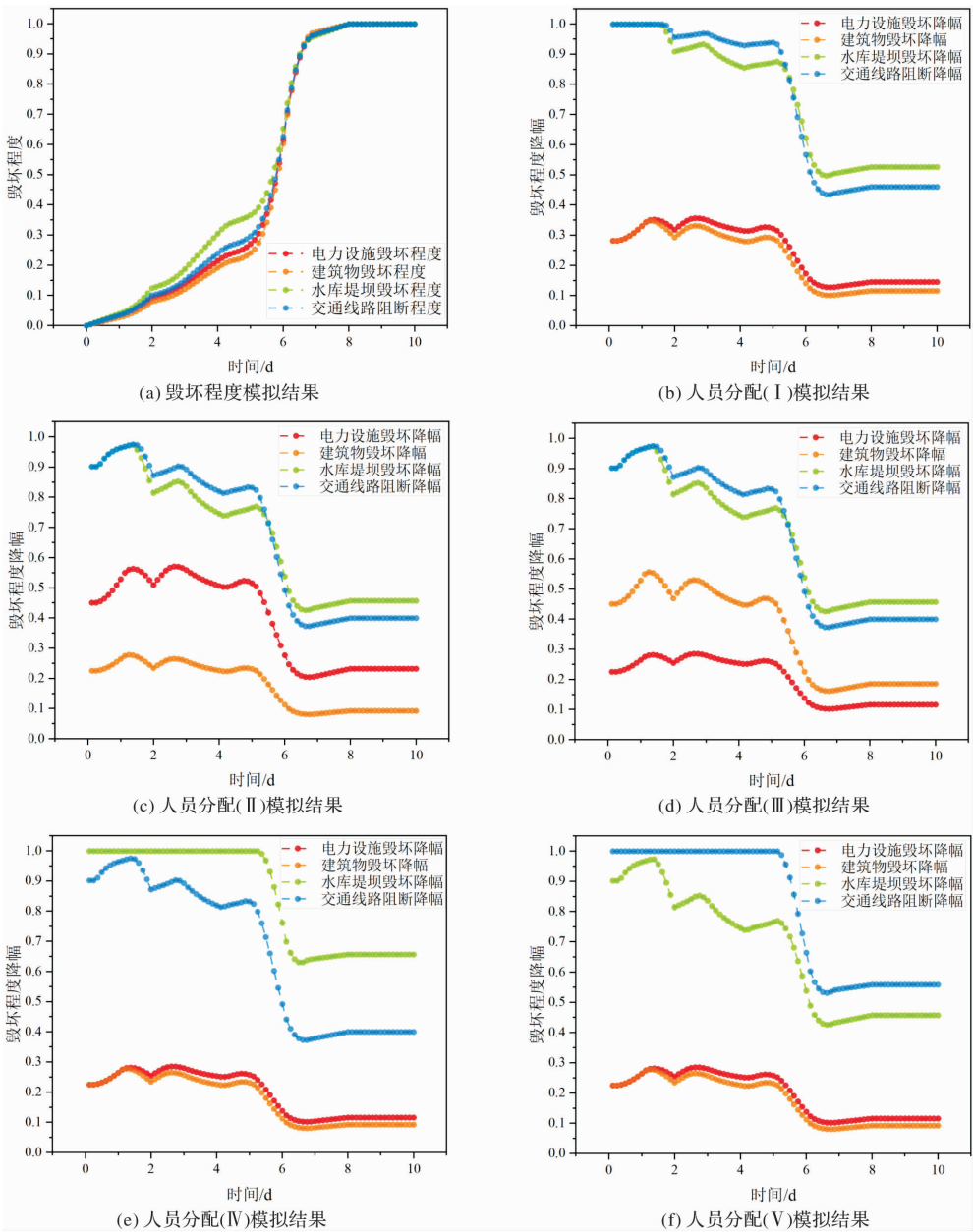


图 11 防灾减灾模拟

3 结语

本文基于系统动力学和台风灾害特征, 构建了台风灾害防灾减灾模型, 其中包含物资人员调度子块, 信息传播子块、灾害系统子块, 对各变量进行仿真模拟。与之前研究不同, 本文考虑了多灾种灾害对城市的影响, 在资源有限情况下, 探究了影响城市应急能力强弱, 信息传播趋势及承灾体毁坏程度的关键因素, 为政府防灾减灾工作方案的制定提供理论支撑。

通过案例分析, 可得出以下结论:

(1) 政府应急资源调度能力越强, 城市到达应急能力峰值的速率越快。

(2) 灾害预警等级越高, 信息热度越高, 持续时间越长, 依照热度曲线可在不同时间段发布不同内容信息以增加民众关注度, 配合减灾工作。

(3) 对水库堤坝、交通线路等较为重要且较易进行防灾减灾工作的设施可加大防灾减灾人员的投入, 对建筑物、电力系统等防灾减灾难度较大的设施可提高其抗灾能力, 选取最优建筑材料及建筑结构进行重修改建, 降低其脆弱性指数, 最大化减小灾害风险。本文仿真的防灾减灾策略取得了较好的结果, 但对于灾中灾民救援及灾后恢复重建等方面并未涉及, 在以后的研究中, 将会进一步完善。

参考文献:

- [1] 殷洁, 戴尔阜, 吴绍洪. 中国台风灾害综合风险评估与区划[J]. 地理科学, 2013, 33(11): 1370-1376.
- [2] XU L F, MENG X W, XU X G. Natural hazard chain research in China: A review [J]. Natural Hazards, 2014, 70(2): 1631-1659.
- [3] KIM H J, MOON I J, KIM M. Statistical prediction of typhoon-induced accumulated rainfall over the Korean Peninsula based on storm and rainfall data [J]. Meteorological Applications, 2019, 27(1): 1-18.
- [4] 袁江南, 王延章, 董磊磊, 等. 基于贝叶斯网络的突发事件预测模型[J]. 系统管理学报, 2011, 20(1): 98-103, 108.
- [5] TAJIMA Y, LAPIDIZ J P, CAMELO J, et al. Post-Disaster Survey of Storm Surge and Waves Along the Coast of Batanes, the Philippines, Caused by Super Typhoon Meranti/Ferdie [J]. Coastal Engineering Journal, 2017, 59(1): 1-11.
- [6] 薛根元, 俞善贤, 何凤翩, 等. 云娜台风灾害特点与浙江省台风灾害初步研究[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 39-47.
- [7] 李倩, 俞海洋, 李婷, 等. 京津冀地区台风危险性评估——基于Gumbel分布的分析[J]. 地理科学进展, 2018, 37(7): 933-945.
- [8] 郭群勇, 裴钰娇. 微博数据位置信息反映台风灾情的有效性分析[J]. 测绘科学技术学报, 2019, 36(4): 406-411.
- [9] 史培军, 汪明, 胡小兵, 等. 社会——生态系统综合风险防范的凝聚力模式[J]. 地理学报, 2014, 69(6): 863-876.
- [10] 王静爱, 雷永登, 周洪建, 等. 中国东南沿海台风灾害链区域规律与适应对策研究[J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 2012(2): 130-138.
- [11] 史培军, 吕丽莉, 汪明, 等. 灾害系统: 灾害群、灾害链、灾害遭遇[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 1-12.
- [12] LIN C H, HOU S K, FUH-YUAN SHIH F, et al. The Effect of Tropical Cyclones (Typhoons) on Emergency Department Visits [J]. Journal of Emergency Medicine, 2013, 45(3): 372-379.
- [13] 张斌, 陈建国, 吴金生, 等. 台风灾害应急物资需求预测模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(7): 891-895.
- [14] 孙少文, 杨斌, 胡志华, 等. 台风灾害下城市应急策略对城市应急能力的影响[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 204-212.
- [15] QIN L J, XU W, ZHAO X J, et al. Typhoon track change - based

- emergency shelter location-allocation model: a case study of Wenchang in Hainan province, China [J]. Injury prevention: journal of the International Society for Child and Adolescent Injury Prevention, 2020, 26(3): 196-203.
- [16] 李健, 张文文, 白晓昀, 等. 基于系统动力学的应急物资调度速度影响因素研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(3): 661-670.
 - [17] 余乐安, 李玲, 武佳倩, 等. 基于系统动力学的危化品水污染突发事件中网络舆情危机应急策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(10): 2687-2697.
 - [18] 邓建高, 张璇, 傅柱, 等. 基于系统动力学的突发事件网络舆情传播研究: 以“江苏响水爆炸事故”为例[J]. 数据分析与知识发现, 2020, 4(2): 110-121.
 - [19] 陆秋琴, 赵洪艳, 黄光球. 地下商业空间灾害突发期间应急救援仿真模型[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 73-80, 112.
 - [20] EDWIN S S, NAVARUN V, ZACHARY A S. Evaluation of the Normalisasi Policy in Jakarta, Indonesia Using System Dynamics [J]. Landscape Architecture Frontiers, 2019, 7(3): 78-93.
 - [21] 于小兵, 曹杰, 王旭明, 等. 基于系统动力学的台风灾害应急策略研究[J]. 管理评论, 2018, 30(2): 222-230.
 - [22] 贾仁安, 丁荣华. 系统动力学: 反馈动态性复杂分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 1-18.
 - [23] WAHI T, JAIN S, BENDER J, et al. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities [J]. Nature Climate Change, 2015, 5(12): 1093-1097.
 - [24] 唐晓春, 刘会平, 潘安定, 等. 广东沿海地区近 50 年登陆台风灾害特征分析[J]. 地理科学, 2003, 23(2): 182-187.
 - [25] 侯静惟, 方伟华, 程猛, 等. 基于 Copula 函数的海南热带气旋风雨联合概率特征分析[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(3): 54-64.
 - [26] 张一文, 齐佳音, 马君, 等. 网络舆情与非常规突发事件作用机制——基于系统动力学建模分析[J]. 情报杂志, 2010, 29(9): 1-6.
 - [27] 郭腾蛟, 李国胜. 基于验证性因素分析的台风风暴潮灾害经济损失影响因子优化分析[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(1): 121-131.
 - [28] 秦一芳, 林双毅, 高雅玲, 等. 台风对城市道路行道树的影响和对策——以福建省厦门市“莫兰蒂”台风为例[J]. 中国农学通报, 2017, 33(34): 135-140.
 - [29] 孙炎, 侯立群, 路晓明, 等. 台风灾害下架空输电线路跳线接续管加固方法研究[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 59-62.
 - [30] 李春梅, 刘锦奎, 潘蔚娟, 等. 暴雨综合影响指标及其在灾情评估中的应用[J]. 广东气象, 2008, 30(4): 1-4.
 - [31] 曹玮. 洪涝灾害的经济影响与防灾减灾能力评估研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013: 27-31.
 - [32] 闫白洋. 海平面上升叠加风暴潮影响下上海市社会经济脆弱性评价[D]. 上海: 华东师范大学, 2016: 89-93.
 - [33] 向春宇. 地方政府职能部门应急联动管理机制研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018: 6-8.
 - [34] 李佳英, 薛建军, 王维国, 等. 2013 年国外重大台风灾害分析与启示[J]. 气象与减灾研究, 2014, 37(2): 50-54.
 - [35] 马玉玲, 袁艺, 潘东华. 我国台风灾害救助应急响应时空分布特征[J]. 灾害学, 2012, 27(3): 132-136.
 - [36] 刘爱华. 城市灾害链动力学演变模型与灾害链风险评估方法的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 53-66.
 - [37] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 143-145.
 - [38] 中国气象局. 热带气旋年鉴. 2011 [M]. 北京: 气象出版社, 2013: 144-146.
 - [39] 孙钦莹. 大规模自然灾害应急准备的容错规划[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 30-33.
 - [40] 叶琼元, 兰月新, 王强, 等. 面向突发事件的网民情绪演化系统动力学模型研究[J]. 情报杂志, 2017, 36(9): 153-159, 105.
 - [41] GIANNAKIDOU C, DIAKOULAKI D, MEMOS C D. Implementing a Flood Vulnerability Index in urban coastal areas with industrial activity [J]. Natural Hazards, 2019, 97(1): 99-120.
 - [42] 卢颖, 王洁鑫, 姜学鹏, 等. 基于 PTVA 模型的房屋多灾种耦合物理脆弱性评估[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(8): 1-6.
 - [43] 唐文虎, 杨毅豪, 李雅晶, 等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2244-2254.

(下转第 234 页)

dents. The people are divided into high and low level disaster coping capacity groups by dichotomy. With the comprehensive consideration of individual characteristics of residents, comparative analysis method and regression analysis method are used to explore the impact mechanism of residents' disaster coping capacity. The results show that: ①the disaster coping capacity of regional residents is at a low to middle level, and the daily disaster preparedness ability is the key factor affecting the residents' disaster coping capacity; ②the disaster coping capacity of residents presents individual differences. Educational background, age and other factors have a greater impact on individual differences, while other factors with individual characteristics have a smaller impact; ③the level of residents with high and low disaster coping capacity and their components are featured by significant group differences. The daily disaster preparedness is the main reason for the capacity gap, among which the housing disaster prevention and emergency material preparation are the key factors. Finally, the paper provides policy suggestions for the management of macro disaster prevention planning as well as disaster education of residents in China, hoping to improve the disaster coping capacity of regional residents and disaster prevention and reduction ability.

Key words: natural disaster; disaster coping capacity; KRP model; entropy method; influence factors

.....
(上接第 227 页)

System-dynamics-based Disaster Reduction Decision for Typhoon Disaster

HAN Jin^{1,2,3} and DAI Erfu^{4,5}

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China; 3. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China; 4. Lhasa Plateau Ecosystem Research Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Typhoon is destructive and easy to occur together with the rainstorm, flood and storm surge, which seriously threatens people's life and property safety in coastal areas. In this paper, based on system dynamics and multi-disaster the prevention and mitigation model of typhoon disaster is established, including material and personnel scheduling sub block, information transmission sub block, disaster system sub block. Taking the typhoon disaster situation and government disaster prevention and mitigation work in Haikou City of Hainan Province as an example, the simulation results show that, the higher the government resource scheduling ability, the faster the city emergency response capacity reaches the peak speed; affected by the early warning level and emergency response capacity, the information heat rises rapidly to the peak value, and then decreases slowly; the disaster resistance and reinforcement of buildings and power system can reduce their vulnerability, and increase the proportion of reservoir dams and traffic disaster prevention and mitigation workers can be greatly reduced Disaster situation. In a word, the proposed model can provide an effective disaster reduction strategy for governments.

Key words: system dynamics; typhoon disaster; urban disaster prevention and mitigation decision; scheduling of resources