

王婷, 吴绍洪, 高江波, 等. 区域台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评估[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 193-200, 210.
[WANG Ting, WU Shaohong, GAO Jiangbo, et al. Coping Capacity Assessment of Regional Typhoon-flood-geological Disaster Chain[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 193-200, 210. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.04.030.]

区域台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评估*

王 婷^{1,2}, 吴绍洪^{1,2}, 高江波¹, 韦炳干¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049)

摘 要:以浙江省苍南县为例, 构建防灾能力、抗灾能力和救灾能力一体化的台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评估指标体系, 应用多级模糊综合评估模型定量评估台风-洪涝-地质灾害链减灾能力。结果表明, 苍南县各乡镇台风-洪涝-地质灾害链减灾能力可应对台风等级为 10~12 级, 空间上呈现南北高、中部低的分布特征。评估结果较为准确地识别各乡镇减灾能力的优势和限制因素, 其减灾能力差异主要受房屋抗风能力、房屋参保、工程设施抗洪能力等因素影响。区域台风-洪涝-地质灾害链减灾能力应基于减灾资源、灾害危险性提出具有针对性的减灾策略。

关键词:灾害链; 台风-洪涝-地质灾害; 减灾能力; 多级模糊综合评价模型; 定量评估

中图分类号: X43; X915.5; P642.22; TP303; P444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2022)04-0193-09
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.04.030

自然灾害是当前全球面临的挑战性课题, 尤其是 21 世纪以来受极端气候影响, 各种自然灾害规模和频率呈现明显上升趋势^[1-3]。多种自然灾害类似多米诺骨牌的链发现象频繁出现, 人类生命、财产等多个方面影响加剧^[4]。2013 年, 超强台风海燕登陆菲律宾, 造成洪涝等多种灾害, 导致 1 607 万人受灾, 28 689 人受伤, 7 329 人死亡或失踪^[5-6]; 2019 年, 1909 号台风“利奇马”从浙江省温岭市沿海登陆, 导致暴雨、洪涝、泥石流等多种自然灾害, 造成我国浙江、山东、江苏等 9 省 64 市 1 402.4 万人受灾, 死亡 66 人, 紧急转移人口 209.7 万人, 农作物受灾面积 1 137 km², 直接损失 515.3 亿元^[7-8]; 同年, 印度季风强降雨引发洪涝, 影响 13 个邦, 造成近 2 000 人死亡^[9]。可见, 多种自然灾害在时间或空间上相互作用使区域致灾强度不断加重^[10]。减灾能力是降低自然灾害损失的重要组成部分, 而对减灾能力进行科学评价是提升灾害管理能力的有效途径。因此, 充分认识多灾种灾情放大作用, 定量评估多灾种减灾能力对区域防灾减灾及应对全球气候变化具有重要意义。

多灾种是指在特定地区或特定时间, 多种致灾因子并存或并发的现象, 包括灾害链、灾害群、灾害遭遇^[11]。其中灾害链是指灾害间存在连锁、链式、诱发等相互关系, 由一种灾害引发一系列次生灾害的现象^[4, 11-12], 在空间上和时间上的相互作用可造成灾情累积放大作用^[10]。虽然美国国家减灾战略^[13]、兵库行动框架^[14]、IPCC^[15]、联

合国全球减灾大会报告^[16]等均把多种灾害这种相互关联现象作为重要内容。但由于自然灾害研究在 20 世纪 80 年代主要侧重于灾害发生可能性和危险性, 直到 20 世纪 90 年代“国际减灾十年计划”的推进发展, 才逐步将区域减灾能力纳入自然灾害研究中^[17], 另外多灾种致灾因子间关系复杂, 使得多灾种研究较为困难。因此, 国内外少有多灾种灾害链减灾能力评估研究。目前, 多灾种减灾能力评估指标体系主要由社会经济、减灾资源等少量指标^[18-21]组成, 也有学者^[22]从灾前情况、应对能力、适应能力、灾害损失、灾害暴露多个角度出发构建多灾种减灾能力指标体系。多灾种减灾能力评估方法以加权综合评价法、减灾能力指数、GIS 结合方法^[18-25]为主。现有多灾种研究中, 多灾种风险评估中已有较多研究考虑区域内不同灾种间的相互关系, 然而对于多灾种减灾能力研究, 评估指标体系侧重于基础减灾资源信息, 往往易忽略区域内不同灾种间的联系, 且减灾指标体系要素与灾害等级间对应关系较弱。

因此, 本文拟通过灾害危险性及其减灾资源多要素, 构建涵盖减灾全过程(灾前、灾中、灾后)的防灾能力、抗灾能力、救灾能力一体化的台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评估指标体系, 并基于历史灾情数据构建减灾能力指标与灾害等级之间的对应关系, 应用多级模糊综合评估模型定量评估方法开展以原生灾害等级为基础的台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评估, 以期对区域灾

* 收稿日期: 2022-06-01 修回日期: 2022-07-11

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC1508801)

第一作者简介: 王婷(1995-), 女, 土家族, 贵州务川人, 硕士, 主要从事自然灾害风险研究. E-mail: wangting_18s@igsnr.ac.cn
通信作者: 韦炳干(1982-), 男, 壮族, 广西大化人, 副研究员, 主要从事环境地理与健康研究. E-mail: weibg@igsnr.ac.cn

害链减灾能力建设提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

苍南县位于浙江省最南部,属于沿海丘陵地带,地形复杂,其内陆以山地为主,地质灾害隐患较多。县内台风活动频繁,降雨量集中且差异大,多年平均降雨量在1 300~2 100 mm之间,易造成台风-洪涝-地质灾害。例如,2009年受“莫拉克”影响,苍南全境普降暴雨,多处地段山洪暴发,莒溪镇突发泥石流,多间房屋被冲毁。不同台风路径对区域造成的严重程度有所不同,据苍南县历史台风(2001—2016年)的影响程度差异,可将其登陆类型分为4类(图1):福州以南登陆类、台州以北登陆类、宁德-温州沿线登陆类、海上登陆类。

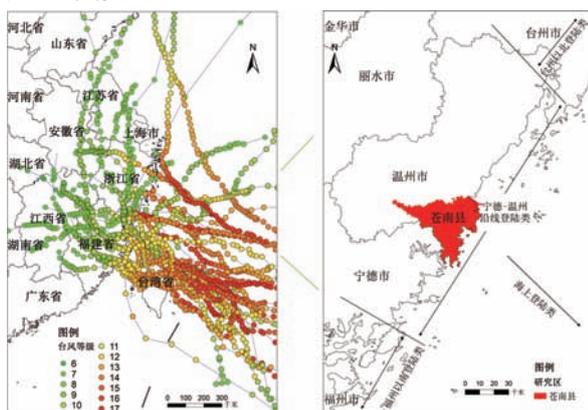


图1 研究区及研究区台风登陆类型(审图号:GS(2020)4619)

1.2 数据来源

本文研究数据主要包括自然灾害(台风、洪涝、地质灾害)、地形、气象、社会经济等多个数据集。台风、洪涝历史灾害数据集来源于浙江省苍南县应急管理局官方记录资料,数据涵盖2001—2016年历史灾害发生时间、受灾人口、紧急转移人口、倒塌房屋数量、严重损坏数量、直接经济损失、救灾应急响应级别、救灾资金数量等。2001—2016年台风24 h累积降雨量来源于中国气象局气象台站的逐日降水观测记录,该数据集已经过国家气象信息中心的质量控制;其24 h不同乡镇暴雨重现期数据及山洪预警24 h累积降

雨量由已结题的苍南县山洪灾害防治项目相关结果计算得到。减灾能力评估中诸多如研究区资金投入、避难所容量、物资储备、医疗条件等减灾资源数据来源于苍南县民政局,堤防工程、灌溉工程、水闸工程抗灾设防标准等水利工程数据源于苍南县水利局。具体数据及来源见表1。考虑本文获取的减灾资源、历史灾情等统计数据单元未到具体社区(街道)或行政村且研究区属于非大尺度行政单元,因此本研究可视化评估结果表达单元为乡镇。

1.3 研究方法

1.3.1 灾害链评估流程

台风-洪涝-地质灾害链减灾能力定量评估流程如图2所示。①分析台风灾害链成灾过程,确定区域内台风风力及台风降水为关键致灾因素,明确区域台风-洪涝-地质灾害链类型。②基于台风灾害链中致灾因子类型,建筑、生命系统等承灾体重要程度,灾害链次生灾害危险性,自然灾害减灾能力的社会、管理、工程等措施,构建包括防灾能力、抗灾能力和救灾能力的台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评估指标体系。③将获取的指标数据进行数据转换,并进行数据标准化处理,应用层次分析法-BP神经网络模型(AHP-BP神经网络)确定各项评价指标的权重。④应用多级模糊综合评价模型评估灾害链减灾能力,并以灾害链原生灾害级别表征评估结果。

1.3.2 评价指标体系

首先,灾害链减灾能力指标体系需根据区域历史自然灾害特点,分析区域发生多种自然灾害的组合形式,构建具有区域针对性的减灾能力指标体系;其次,灾害链减灾能力评价指标体系构建并非基于不同单灾种减灾能力指标叠加,而需通过原生灾害与次生灾害之间的相互关系构建灾害链减灾能力评价指标体系。如台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评价指标体系中公共设施抗洪等级,其定量计算时需同时考虑历史台风风力级别、台风降水、公共设施抗洪标准。因此,鉴于我国东南沿海地区面临较大的台风-洪涝-地质灾害风险,并基于前人关于自然灾害减灾能力评估已取得的研究成果^[18-19,22,24-30],结合防灾减灾中灾前、灾中、灾后不同减灾过程的防抗救能力,灾害危险性与减灾资源多要素,灾害链不同灾种间的相互关系,多灾种与单灾种的共性,并结合专家意见、历史文献资料,建立具有系统性、科学性、代表性、综合性的防抗救一体化台风-洪涝-地质灾害链减灾能力指标体系(表2)。

表1 研究区数据类型及来源

数据类型	具体数据	来源
历史灾情数据	灾害发生时间、经济损失、灾害响应级别等	浙江省苍南县应急管理局(2001—2016年统计数据)
台风路径数据	台风路径、最大风速、台风级别	浙江省温州市气象局网站
地质灾害数据	地质隐患点类型、空间位置、具体成因等	浙江省苍南县国土局
气象数据	台风24 h累积降雨量 暴雨设计重现期、山洪预警累积降雨量	国家气象信息中心(2001—2016年) 浙江省水文局(2015年浙江省苍南县山洪灾害防治项目分析评价报告)
社会经济数据	区域人口、区域面积、GDP等	浙江温州市统计年鉴(2001—2016)
减灾资源数据	避难所容量、医院病床数、救援装备等	浙江省苍南县民政局(2018年统计数据)
设施设计标准	防洪工程、通讯、电力等设施防洪设计标准 电力设施抗风设计标准	防洪标准(GB50201—2014) 110~500 kV架空送电线路设计技术规范:DL/T 5092—1999

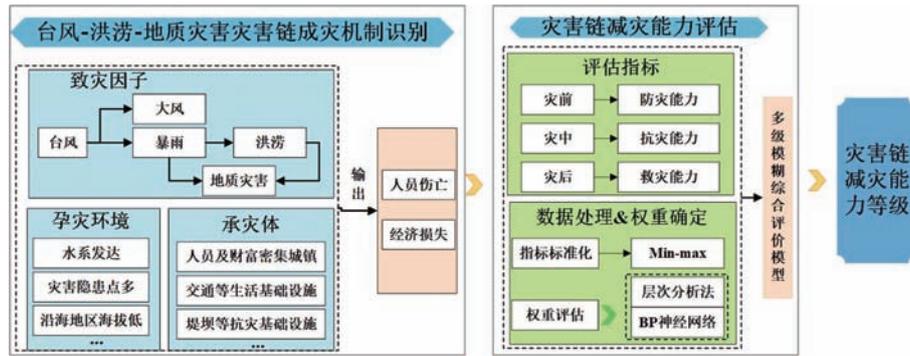


图2 台风灾害链减灾能力定量评估流程图

表2 台风-洪涝-地质灾害链减灾能力指标体系

二级指标	三级指标	描述
灾害监测	气象监测覆盖率	气象监测覆盖面积占区域面积的比值/%
	地质灾害监测覆盖率	地质灾害监测覆盖面积占区域面积的比值/%
	水文监测覆盖率	水文监测覆盖面积占区域面积的比值/%
灾害预警	户均通讯工具数	手机等通讯工具数量与区域人口总户数的比值/(部/户)
	山洪预警系统	区域内具有山洪灾害预警系统数量/个
	气象预警系统	区域内具有地质灾害预警系统数量/个
	房屋参保比例	购自然灾害房屋保险的总家庭数占房屋倒塌住户数的百分比/%
灾害保险	农业参保比例	购自然灾害农业保险的总家庭数占农业受损家庭数的百分比/%
	渔业参保比例	购自然灾害渔业保险总家庭数占渔业受损家庭数的百分比/%
	灾害公众意识	公众意识
灾害科技支撑	灾害科研单位	区域灾害科研单位数量/个
设施抗洪能力	防洪工程抗洪等级	堤防/水闸/排涝工程对洪水的设防标准或级别/级
	交通设施抗洪等级	交通设施对洪水的设防标准或级别/级
	通讯设施抗洪等级	通讯设施对洪水的设防标准或级别/级
	电力设施抗洪等级	电力设施对洪水的设防标准或级别/级
抗灾能力	山洪危险性	重点流域防治区的自然村落在土壤不同含水量条件下需转移时的最低 24 h 累积降雨量/mm
	房屋抗风等级	房屋对台风的设防标准或级别/级
设施抗风能力	电力设施抗风等级	电力设施对台风的设防标准或级别/级
	通讯设施抗风等级	通讯设施对台风的设防标准或级别/级
	交通设施抗风等级	交通设施对台风的设防标准或级别/级
	抗地质灾害能力	地质灾害危险性
政府灾害预案	灾害应急预案数	政府部门已建立的灾害应急预案数量/套
物资储备能力	物资总储备数	区域所有减灾储备库物资总储备量/套
避难场所	避难所容量	区域所有避难所可容纳的总人口数/人
医疗条件	医院总病床数	区域所有医院的病床总数/张
综合消防救援	综合救援设备数	区域内综合救援设备数量/套
救灾能力	应急装备	区域内应急救援设备数量/套
	资金保障能力	资金救助水平
应急保障能力	人均储蓄额	区域内储蓄额与总人口数的比值/(万元/人)
	应急通信设备保障	区域内通信设施的应急设备供应量/套
	应急通信人员保障	区域内通信设施的应急维修人员数量/人
	应急电力设备保障	区域内电力设施的应急设备供应量/套
应急电力人员保障	区域内电力设施的应急维修人员数量/人	

(1) 防灾能力指灾前准备能力, 不同防灾能力指标对于反映地区灾前准备能力具有重要指示作用, 主要包括灾害监测、灾害预警、灾害保险、灾害公共意识、灾害科研支撑。气象、水文、地质监测预警是展开台风灾害链减灾的基础。防灾减灾教育及公众防灾减灾意识提升可更好地避免生命和财产损失。

(2) 抗灾能力是指地区各类重要承灾体抵抗自然灾害的能力, 包括设施抗灾能力及次生灾害危险性。房屋、交通、电力等设施抗灾能力是区域内公众关系最密切的保障, 直接影响生命安全和财产损失。灾害危险性是地区在遭遇台风后可能发生山洪、地质次生灾害的可能性。山洪危险性是反映区域地质环境稳定性、防洪工程设施完善的重要影响因素; 地质灾害危险性是反映区域地质环境稳定性的决定性因素, 也是评价区域是否导致台风-洪涝-地质灾害链的重要条件。

(3) 救灾能力是地区救灾物资储备能力及应急管理保障的重要依据, 主要包括灾害应急预案、物资储备能力等。灾害应急预案、应急保障等是做到统一指挥、有效动员、救助受灾群众及财产的关键。物资储备、资金救助及救援队伍等资源是灾后减少人员伤亡、减轻经济损失的重要保障。

根据指标数据的量化特征, 指标可分为定性指标和定量指标。前者包括灾害监测预警、灾害科技支撑等, 后者则包括医疗条件、防洪工程抗灾等级、房屋抗灾等级等。不同致灾程度下减灾资源需求具有差异性, 为准确描述区域自然灾害减灾能力大小, 不同指标应以原生自然灾害强度表征减灾能力具体水平。为使指标数据对应灾害级别, 指标需通过历史灾情数据将现有设备信息和防灾基础设施资料转换为基于灾害级别的指标数据, 如房屋参保的应灾等级可由现购自然灾害房屋保险比例与历史台风灾害损失曲线确定, 灾害损失曲线关系的构建基础为苍南县 2001—2016 间台风倒塌房屋间数与台风灾害等级。其他数据预处理及数据转换可参考台风减灾能力定量评估研究^[27]。

1.3.3 指标权重

本文采用 AHP-BP 神经网络组合法确定各指标权重, 可减少人为主观因素影响, 有效提高权重评估的便捷性和准确性^[27]。首先, 应用层次分析法(AHP)计算各个台风减灾能力指标的权重。其次, 应用模糊综合评价法计算出的防灾能力、抗灾能力、救灾能力等级指标值, 随机选取 16 个乡镇三项能力等级值进行 BP 神经网络模型训练, 另 3 个乡镇的等级值作为检验值, 直至误差检验控制在 $[0, 0.1]$ 范围为止。

1.3.4 评价模型

在单灾种台风减灾能力评估模型^[27]基础之上, 采用多级模糊数学评价法评估台风-洪涝-地质灾害链减灾能力, 具体如下:

(1) 因素集。影响台风灾害链减灾能力因素分为三层, 第一层评价因素集合 U 为 $U = \{u_1, u_2, u_3\}$; 第二层评价因素集为 $u_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots,$

$u_{ij}\}$, 第三层评价因素集为 $u_{ij} = \{u_{ij1}, u_{ij2}, \dots, u_{ijs}\}$, 其中 $i=1, 2, 3; j=1, 2, 3, \dots, m; s=1, 2, 3, \dots, n$ 。

(2) 多级评价等级矩阵。模糊综合评价判断矩阵为多级, 即 R_{ijs}, R_{ij}, R_i ; 不同层级指标在评价集上的隶属度均采用模糊三角形分布构造隶属函数, $U_{ijs,v}, U_{ij,v}, U_{i,v}$ 为三级指标 ijs 、二级指标 ij 、一级指标 i 对第 v 等级的隶属度 ($v=8, 9, 10, \dots, 17$)。

(3) 多级模糊综合评判。考虑不同层级指标对于因素集的模糊性及结果可视化, 由原来单级模糊综合评判细化到三级模糊综合评判。一级模糊综合评价模型为: $B_{ij} = A_{ij} \times R_{ij}$; 二级模糊综合评价模型为:

$$A_{ij} = (A_{ij1}, A_{ij2}, \dots, A_{ijs}); \quad (1)$$

$$B_{ij} = A_{ij} \times R_{ij}; \quad (2)$$

$$R_{ij} = \begin{pmatrix} R_{ij1} \\ R_{ij2} \\ \dots \\ R_{ijs} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

以此类推, 三级模糊综合评价模型为:

$$A_i = (A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ij}); \quad (4)$$

$$B = A_i \times R_i; \quad (5)$$

$$R_i = \begin{pmatrix} R_{i1} \\ R_{i2} \\ \dots \\ R_{ij} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

式中: B_{ij} 、 B_i 、 B 分别为二级指标、一级指标、台风灾害链减灾能力的模糊综合评价结果; A_{ijs} 、 A_{ij} 、 A_i 分别为减灾能力三级指标、二级指标以及一级指标的权重矩阵; R_{ijs} 、 R_{ij} 、 R_i 分别为减灾能力三级指标、二级指标、一级指标对各等级的隶属矩阵。

(4) 防抗救能力等级值 P_1 、 P_2 、 P_3 及台风灾害链减灾能力等级值 P 。根据 $P_i = B_i V^T$, $P = B V^T$, 公式计算评价等级值。其中 V 表示评价集矩阵, 即 $V = [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]$; T 表示矩阵转置; $i=1, 2, 3$, 即 P_1 、 P_2 、 P_3 为防灾能力等级、抗灾能力等级、救灾能力等级。

2 结果与分析

2.1 指标权重结果

根据台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评估指标体系(见表 2), 结合数据的可获取性, 确定苍南县台风灾害链减灾能力指标体系为 18 个三级指标。应用层次分析法计算得出苍南县台风-洪涝-地质灾害链减灾能力各指标权重(表 3)。然后, 随机选用已计算的 16 个乡镇为样本, 通过 BP 神经网络学习训练后, 利用其他 3 个乡镇进行评价与预测值误差检验, 误差均小于 0.1。由此可知, 台风-洪涝-地质灾害链减灾能力指标权重评估结果可靠。

表 3 苍南县台风-洪涝-地质灾害链减灾能力指标体系权重

一级指标	二级指标	权重	三级指标	权重	
防灾能力 0.311 9	灾害监测	0.102 7	气象监测覆盖率	0.051 3	
			地质监测覆盖率	0.025 7	
			水文监测覆盖率	0.025 7	
	灾害预警	0.102 6	户均通讯工具数	0.042 2	
			山洪预警系统	0.026 8	
			气象预警系统	0.033 6	
			灾害保险	0.044 2	
	灾害公众意识	0.062 4	房屋抗风等级	0.107 7	
			公众意识	0.062 4	
	抗灾能力 0.490 5	抗风能力	0.196 3	电力设施抗风等级	0.041 3
通讯设施抗风等级				0.047 3	
防洪工程抗风等级				0.085 9	
抗洪能力		0.196 2	交通设施抗洪等级	0.024 2	
			通讯设施抗洪等级	0.017 1	
			电力设施抗洪等级	0.012 8	
			山洪危险性	0.056 2	
抗地质灾害能力		0.098 0	地质灾害危险性	0.098 0	
救灾能力 0.197 6		政府灾害预案	0.047 6	灾害应急预案数	0.047 6
		物资储备能力	0.036 6	物资总储备数	0.036 6
	避难场所	0.059 6	避难所容量	0.059 6	
			资金救助水平	0.011 5	
	资金保障能力	0.017 2	人均储蓄额	0.005 7	
			医疗条件	0.036 6	医院总病床数

2.2 台风-洪涝-地质灾害链减灾能力

(1) 台风-洪涝-地质灾害链防-抗-救灾能力等级。根据苍南县防抗救减灾能力等级分布柱状图(图3)及各乡镇指标分布情况知:不同乡镇防灾能力总体良好且空间差异较小,绝大多数乡镇防灾能力等级为14级,灵溪镇、藻溪镇、马站镇、霞关镇、凤阳镇的防灾能力等级为15级。苍南县在灾害监测、灾害预警方面可基本全覆盖,空间差异来源于房屋参保比例。

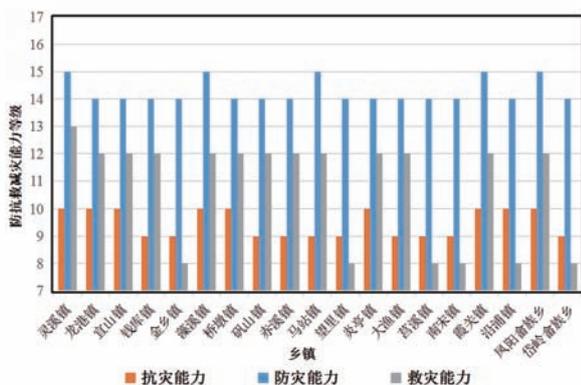


图3 苍南县各乡镇防抗救减灾能力等级分布柱状图

各乡镇抗灾能力等级处于中等水平,9级偏多,占有所有乡镇总数的53%;从空间格局看,抗灾能力整体呈现出沿海低内陆高的分布特征,差异主要由房屋抗风能力、设施抗洪能力、次生灾

害危险性所致。以房屋抗风能力为例,灵溪镇居住住房砖混及钢混结构共占85.3%、砖木结构14%、木结构0.4%、其它结构0.3%,而赤溪镇居住住房砖混及钢混结构为56.6%、砖木结构32.7%、木结构4.9%、其他结构5.8%。

乡镇救灾能力等级在8~13级之间,绝大部分集中于12级左右,等级最高的为灵溪镇,最低的有金乡镇、望里镇、莒溪镇、南宋镇、沿浦镇、岱岭乡;救灾能力等级空间差异较大。灾害应急预案、人均物资、资金救助三类评估要素在乡镇较小尺度背景下数据可获取性相对不足,历史灾情中受伤人数相对较小,因此救灾能力等级差异来源于避难所容量。

(2) 台风-洪涝-地质灾害链减灾能力等级。基于防灾能力等级、抗灾能力等级及救灾能力等级,通过模糊综合评价法得到区域乡镇台风-洪涝-地质灾害链减灾能力等级。评估结果(图4)表明:从全县空间分布看,台风灾害链减灾能力等级呈现南北高、中部低分布特征。各乡镇可应对台风-洪涝-地质灾害链减灾能力等级处于10~12级;区域53%的乡镇台风灾害链减灾能力可应对12级,地区集中分布于北部地区及苍南县最南端,具体乡镇为灵溪镇、龙港镇、宜山镇、桥墩镇、藻溪镇、马站镇、凤阳乡、霞关镇、大渔镇、炎亭镇;区域42%的乡镇台风灾害链减灾能力可应对11级,主要分布在中部地区及东南部地区,具体为莒溪镇、钱库镇、金乡镇、南宋镇、赤溪镇、

岱岭乡、沿浦镇、矾山镇；望里镇的台风灾害链减灾能力可应对等级最低。就台风灾害链减灾能力等级空间异质性而言，空间差异性来源为房屋参保比例、房屋抗风能力、设施抗洪能力、灾害危险性、避难所容量。

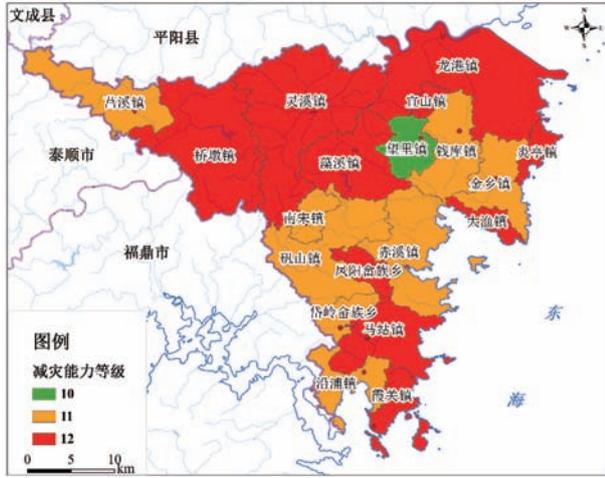


图4 苍南县各乡镇台风-洪涝-地质灾害链减灾能力等级图

3 讨论

苍南县北部地区地势平坦、地质灾害隐患点相对较少、承灾体密集，区域各减灾资源相对丰富，但区域台风降雨较集中、地势低平排水不畅，积水风险高，农业、能源等各要素易受台风洪涝影响。因此该区域需加强台风-洪涝-地质灾害链联合预报预警，及时疏通区内河道系统，加固防洪堤坝工程，适当提高区内主要经济产业、工业企业抗台风标准、防洪标准以减少台风-洪涝-地质灾害链累积损失。南部沿海地区地势略高，城镇化水平相对较低，农业人口比例较高，住宅房屋类型以单栋为主，台风路径密度处于乡镇第一阶梯，多年汛期月降水量较高，受台风灾害影响较大。鉴于当前减灾现状，该区域需加强对台风暴雨的预报预警以及区内房屋规范建设，合理规划沿海乡村地区养殖业、渔业发展，加强内陆农村农业灾害防范工作，继续保持灾害防灾减灾知识宣传教育尤其是渔业、养殖业灾害风险防范意识，尽力保障农渔养殖业户减少经济损失。南部沿海地区与其他沿海地区的减灾能力水平有明显差异，这与台风韦帕、森拉克、桑美、罗莎曾登陆苍南南部地区，尤其是2006年桑美重创苍南县南部乡镇后积极重建灾区、提高台风灾害防范工作的客观事实相符。其他沿海地区乡镇单元呈带状连续分布，地势有起伏，地质隐患点险情等级较高(威胁人口及威胁经济较大)，台风期间若产生洪涝、滑坡等次生灾害，其险情较大。另外，县域危化企业几乎都分布于金乡镇内。据此，该区台风期间需注意隐患点监测与预警，降低台风暴雨导致隐患点成灾风险，区内管理应注意海上作业、养殖业较高风险人群及产业安全。同时，应关注灾后危化企业泄露健康暴露风险，加强企

业自然灾害暴露风险预测预警，定期进行灾后应急响应机制的完善。中部地区山地多、地质隐患点密度大、设施建设相对落后，台风暴雨易形成山洪，区内山洪预警雨量相对较低，群众生命财产易受到威胁。因此，该区域主要目标是保护群众安全，加强台风暴雨预警预测，定时对地质灾害易发区如南宋镇、矾山镇周围居民环境进行巡查，加大防灾减灾知识宣传，定期开展灾害应急预案制定以更好应对台风及台风-洪涝-地质等灾害链，减少灾害损失。西部地区人口密度小，社会经济发展较缓慢，地形地貌以山地为主、山高坡陡，境内隐患密度最高，易引发地质灾害。据此，隐患密度较大的居民地区在台风期间需注意防范突发性山洪、泥石流，台风灾害管理的重点是加强防灾减灾宣传、加大地质灾害隐患预报预警力度、增大减灾资源投入提高区域台风-洪涝-地质灾害链减灾能力，减轻人员伤亡以及房屋损失。

评估结果表明，灾害链减灾能力受资源与能力要素、灾害危险性综合影响。一方面，医疗条件、物资储备、应急装备等资源是减灾建设的主要考虑因素，减灾资源较大程度上可降低灾害过程中的人员伤亡与经济损失。另一方面，灾害链次生灾害危险性对减灾具有重要影响。如：①山洪危险性，不同乡镇重点流域防治区的自然村落受山洪威胁需要紧急转移的临界累积降雨量差异显著(图5)。岱岭乡内重点流域防治区的自然村落在前期土壤含水量中等($Pa = 0.75 W_M$)、丰富($Pa = 0.9 W_M$)(W_M 为流域蓄水容量，单位mm)条件下受山洪威胁需转移时的最低临界累积降雨量为616 mm，在所有乡镇中危险性最低，危险性应灾等级居最高且为17级；桥墩镇最低临界累积降雨量为308 mm、377 mm，危险性应灾等级次之；灵溪镇、龙港镇、宜山镇等10个乡镇最低临界累积降雨量为96 mm、133 mm，危险性最高，应灾等级最低。②地质灾害危险性，区域内降雨-地质灾害类型隐患点数量差异较大。如研究区桥墩、莒溪、矾山等13个乡镇具有降雨-地质灾害隐患点，地质灾害隐患危险性较高；龙港、宜山、藻溪等6个乡镇无降雨-地质灾害隐患点，地质灾害隐患危险性低。

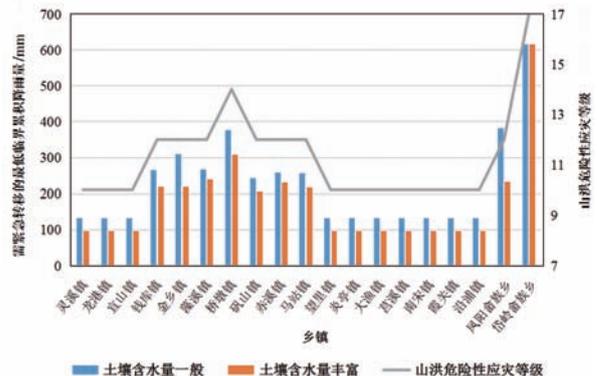


图5 苍南县各乡镇重点防治区在土壤不同含水量条件下需转移时的临界累积降雨量分布及各乡镇山洪危险性应灾等级柱状图

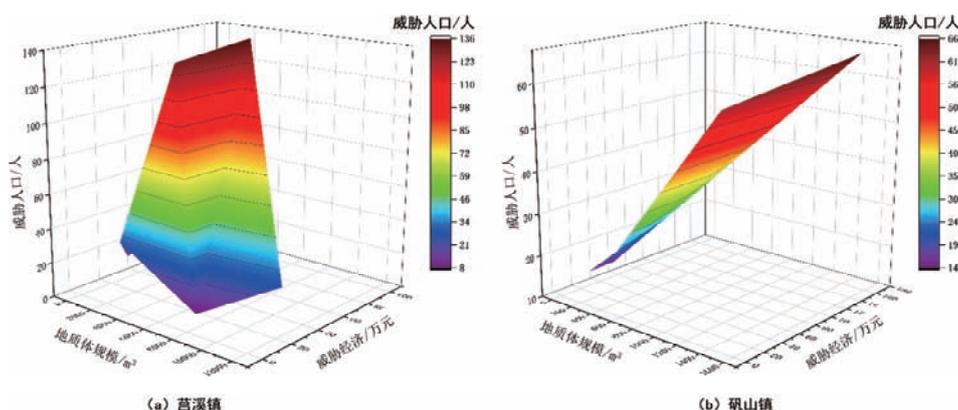


图6 苍南县乡镇不同降雨-地质隐患点隐体规模与其威胁人口、威胁财产的关系

因此, 区域台风-洪涝-地质灾害链防灾减灾工作应在不同时段, 基于减灾资源与能力要素、灾害危险性, 提出具有针对性的减灾策略。首先, 在灾害链孕育阶段对自然灾害隐患点或重点防治区采取工程/生态措施, 从根源降低灾害危险性, 阻断灾害链的形成或降低灾害链灾情累积放大效应。如, 对高风险地质灾害隐患点采取边坡加固等工程治理; 合理的开展土地利用结构调整、加强沿海防护林保护和建设等^[31]。另外, 加强台风易发区灾前减灾资源储备, 加强台风及次生灾害联动预报预警, 定期对房屋等基础设施、防洪工程设施进行普查、评估、修缮^[26], 确保灾害易发区做好防灾工作。其次, 构建包括人口、灾情、应急救援、灾害评估等应急指挥系统, 加强台风、暴雨洪涝、地质灾害信息共享机制、联动预报预警及应急响应协调, 及时做好群众转移避险与应急救援保障等灾前防范、灾后抢救安置工作。综合以上各项因素开展减灾工作, 力求从不同节点强化落实各项措施, 减少灾害链致灾因子总量, 削弱灾害链灾情累积放大效应, 达到防灾减灾目的。

在多灾种减灾能力评价研究中, 较少学者尝试基于不同灾种间的相互关系构建多灾种减灾能力指标体系。DEPIETRI 等^[19]对纽约市进行热浪、内陆洪涝、沿海洪涝多灾种风险评估, 其中减灾能力只有 2 个指标, 指标体系未考虑灾种间的关系。此外, 多灾种减灾能力评估结果多以相对等级或指数表征, 区域可比性难以表现。田从山等^[22]从灾前情况、应对能力、适应能力、灾害损失、灾害暴露五个维度构建四川安宁河流域社区多灾种(滑坡、岩崩、泥石流)减灾能力指标体系, 并以减灾能力指数表征流域内各县减灾能力水平, 该减灾能力指数可用于研究区内不同县域比较, 但并不适用与其他区域进行差异分析, 评估结果的区间可比性较差。因此, 苍南县评估案例以历

史灾情数据、现有设备数据和防灾基础设施数据等为基础, 考虑台风及次生灾害之间的相互关系, 提高了灾害链减灾能力指标科学性; 应用多级模糊综合评价模型确定防抗救能力及减灾能力评估等级, 实现不同层级能力与灾害等级之间的转换, 极大地提高评估结果区域可比性。此外, 基于不同能力要素有利于明确灾害链减灾能力优势与限制因素, 可有针对性的提出区域减灾能力建设规划与决策。

然而, 本研究仍存在一定局限性, 尤其是台风降雨等基础数据可获取性相对不足, 使得评估结果具有一定的偏差。评估指标体系具有科学性和系统性, 但灾害链中部分减灾能力要素完整性仍有进步的空间, 进一步研究有必要构建更加系统可靠的评价指标体系。如: 对于地质灾害危险性, 不同乡镇地质灾害隐患点的隐体规模与威胁人口、威胁财产之间的关系具有差异性(图 6)。因此, 目前以地质灾害隐患点数量表征地质灾害危险性并不是最可靠的, 在数据完整情况下可将不同隐患点与威胁人口、威胁财产定量关系融入地质灾害危险性内容中, 增加或改变地质灾害危险性表征指标, 更加完善台风灾害链减灾能力评估指标体系。此外, 本文在构建评估模型时, 采用多级模糊综合评价方法评估台风灾害链减灾能力, 但这种评估模型是否适应于其他不同类型灾害链减灾能力评估, 有待进一步研究。

4 结论

苍南县评估案例表明各乡镇可应对台风-洪涝-地质灾害链减灾能力等级处于 10~12 级; 乡镇台风灾害链减灾能力等级呈现出南北高、中部低的空间分布特征。各乡镇台风灾害链减灾能力等级差异主要来源为房屋抗风能力、房屋参保、避难所容量、工程设施抗洪能力。评估结果有利

于认识各乡镇的台风灾害链减灾能力,也反映各乡镇的优势和限制因素。区域台风-洪涝-地质灾害链减灾能力应基于减灾资源、灾害危险性提出具有针对性的减灾策略。由于灾害链在演变过程中往往呈现出较为复杂的特点,本研究数据可获得性仍存在一定局限性。然而,本研究提供的指标及评估方法有利于认识区域台风灾害链的减灾能力现状。因此,进一步研究可探索台风灾害链减灾能力评估方法的适用范围。

参考文献:

- [1] HUANG SL, CHANG LF, YEH CT. How vulnerable is the landscape when the typhoon comes? An emergy approach[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(4): 415-417.
- [2] LUNG T, LAVALLE C, HIEDERER R, et al. A multi-hazard regional level impact assessment for Europe combining indicators of climatic and non-climatic change[J]. *Global Environmental Change*, 2013, 23(2): 522-536.
- [3] MYSIAK J, TORRESAN S, BOSELLO F, et al. Climate risk index for Italy[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society a - Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2018, 376: 20170305.
- [4] 哈斯, 张继权, 佟斯琴, 等. 灾害链研究进展与展望[J]. *灾害学*, 2016, 31(2): 131-138.
- [5] BARMANIA S. Typhoon Haiyan recovery: Progress and challenges [J]. *Lancet (London, England)*, 2014, 383: 1197-1199.
- [6] LUM T M R. Haiyan (Yolanda): U. S. and International Response to Philippines Disaster[EB/OL]. (2014-02-10) [2020-07-10]. http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc282292/m1/1/high_res_d/R43309_2014Feb10.pdf.
- [7] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部公布 2019 年全国十大自然灾害[EB/OL]. (2020-01-12) [2021-05-20]. <http://www.mem.gov.cn/>.
- [8] 慕昕瑶, 高路. 不同地形条件下的台风灾害链致灾分析——以“利奇马”台风为例[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 36(5): 74-83.
- [9] CRED. Natural disasters 2019: Now is the time to not give up[EB/OL]. (2020) [2021-04-25]. <https://www.emdat.be/publications>.
- [10] 余瀚, 王静爱, 柴玫, 等. 灾害链灾情累积放大研究方法进展[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(11): 1498-1511.
- [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] 郭增建, 秦保燕. 灾害物理学简论[J]. *灾害学*, 1987, 2(2): 25-33.
- [13] FEMA. National mitigation strategy: partnerships for building safer communities[EB/OL]. (1995) [2020-07-10]. http://hazardmitigation.calema.ca.gov/docs/1995_National_Mitigation_Strategy_web.pdf.
- [14] UNDRR. Hyogo framework for action 2005-2015: building the resilience of nations and communities to disasters, World conference on disaster reduction[EB/OL]. (2007) [2020-05-25]. <https://www.undrr.org/publication/hyogo-framework-action-2005-2015-building-resilience-nations-and-communities-disasters>.
- [15] IPCC. Summary for Policymakers. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [C]//A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press 2012: 1-19.
- [16] UNDRR. Global assessment report on disaster risk reduction 2019 [EB/OL]. (2019) [2020-05-25]. <https://www.undrr.org/publication/global-assessment-report-disaster-risk-reduction-2019>.
- [17] 陈发虎, 吴绍洪, 崔鹏, 等. 1949—2019 年中国自然地理学与生存环境应用研究进展[J]. *地理学报*, 2020, 75(9): 1799-1830.
- [18] 王嘉君, 何亚伯, 杨琳, 等. 基于 GIS 的山区村镇多灾种耦合风险评估[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(1): 102-112.
- [19] DEPIETRI Y, DAHAL K, MCPHEARSON T. Multi-hazard risks in New York City[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(12): 3363-3381.
- [20] SHI Y, ZHAI G, ZHOU S, et al. How can cities adapt to a multi-disaster environment? empirical research in Guangzhou (China)[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(11): 2453.
- [21] TIEPOLO M, BACCI M, BRACCIO S, et al. Multi-Hazard risk assessment at community level integrating local and scientific knowledge in the Hodh-Chargui Mauritania[J]. *Sustainability*, 2019, 11(18): 5063.
- [22] TIAN C S, FANG Y P, YANG L E, et al. Spatial-temporal analysis of community resilience to multi-hazards in the Anning River basin, Southwest China[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 39: 101144.
- [23] ZHOU Y, LIU Y S, WU W X, et al. Integrated risk assessment of multi-hazards in China[J]. *Natural Hazards*, 2015, 78(1): 257-280.
- [24] SEKHRI S, KUMAR P, FURST C, et al. Mountain specific multi-hazard risk management framework (MSRMF): Assessment and mitigation of multi-hazard and climate change risk in the Indian Himalayan Region[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 118: 106700.
- [25] 谢礼立. 城市防震减灾能力的定义及评估方法[J]. *地震工程与工程振动*, 2006(3): 1-10.
- [26] WU S H, GAO J B, WEI B G, et al. Building a resilient society to reduce natural disaster risks[J]. *Science Bulletin*. 2020, 65(21): 1785-1787.
- [27] WANG T, YANG L S, WU S H, et al. Quantitative assessment of natural disaster coping capacity: An application for typhoons [J]. *Sustainability*, 2020, 12(15): 5949.
- [28] SHAO Q Q, LIU G B, LI X D, et al. Assessing the snow disaster and disaster resistance capability for spring 2019 in China's Three-river headwaters region [J]. *Sustainability*, 2019, 11(22): 6423.
- [29] ZHANG Y F, QU H H, YANG X G, et al. Cropping system optimization for drought prevention and disaster reduction with a risk assessment model in Sichuan Province[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01095.
- [30] FERREIRA M A, DESA F M, OLIVERIRA C S. The Disruption Index (DI) as a tool to measure disaster mitigation strategies[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016, 14(7): 1957-1977.
- [31] 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.

Risk Assessment of Extreme Precipitation – Induced Geological Disaster Chain: A Case Study of Shuicheng County, Guizhou Province

RONG Guangzhi¹, ZHANG Jiquan¹, LI Tiantao^{2,3}, FANG Weihua⁴

(1. *School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;*

2. *College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;*

3. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geo Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;* 4. *Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs and Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)*

Abstract: By selectrg indicators from 4 aspects: hazard of extreme precipitation induced geological disaster chain, exposure and vulnerability of the disaster – bearing body, and disaster prevention and mitigation capacity, a risk assessment index system and assessment model based on different extreme precipitation recurrence period scenarios is established to carry out risk assessment study of extreme precipitation – induced geological disaster chain in Shuicheng County, Guizhou Province. The results show that the risk of extreme precipitation – induced geological disaster chain in Shuicheng County is mainly very low and low risk. The higher the amount of extreme precipitation, the higher the overall risk. The high – risk areas are mainly concentrated in the county town of Shuicheng County, the central towns of Miluo, A’ga, and Panlong and the eastern towns of Bi’de and Huale. In these high – risk areas, countermeasures related to geological disaster risk prevention should be formulated, especially during the flood season when the implementation of various tasks of disaster prevention and mitigation for different types of disasters in the region should be strengthened to protect the lives and properties of residents.

Keywords: geological disaster; extreme precipitation; risk assessment; Shuicheng county

(上接第 200 页)

Coping Capacity Assessment of Regional Typhoon – Flood – Geological Disaster Chain

WANG Ting^{1,2}, WU Shaohong^{1,2}, GAO Jiangbo, WEI Binggan¹

(1. *Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Cangnan county in Zhejiang Province is selected for the study area. An indicator system for the assessment of multi – hazards coping capacity is developed according to three dimensions, including reduction ability, resilience ability, and relief ability. The coping capacity of typhoon – flood – geological disaster chain is quantitatively estimated by using the multi – hierarchy fuzzy comprehensive evaluation model. The results show that the coping capacity of Cangnan county is prepared to deal with 10 – 12 intensity grades of typhoon – flood – geological disaster chain. The coping capacity is higher in the northern and southern of Cangnan, while it is lower in the central. Moreover, the index values of disaster reduction ability, disaster resilience, and disaster relief ability reveal the advantages and limitations of typhoon – flood – geological coping capacity. The variation in the coping capacity among the towns are influenced by anti – wind capability of house, housing insurance, anti – disaster capability of the engineering facilities, etc. Therefore, a specific disaster reduction strategy for regional typhoon – flood – geological disaster chain should be proposed according to disaster reduction resources elements and disaster risk factors.

Keywords: disaster chain; typhoon – flood – geological disaster; coping capacity; multi – hierarchy fuzzy comprehensive evaluation model; quantitatively evaluate