

基于模糊AHP的地质工程灾害应急管理评估指标体系研究

贺小林

长江岩土工程有限公司，湖北武汉

摘要：针对我国地质工程灾害频发、应急管理评估难以量化的问题，本文聚焦“灾害预防响应处置恢复”全流程，引入模糊AHP层次分析法，构建地质工程灾害应急管理评估指标体系。确立“目标层—准则层—指标层”三级结构，通过模糊判断矩阵构造、权重计算与一致性检验，全面覆盖地质工程灾害应急管理核心环节。以某山区高速公路边坡崩塌应急工程、某水电站库区滑坡应急工程、某矿区地面塌陷应急工程为实证案例，验证体系与模型的科学性、可行性。本研究为地质工程灾害应急管理提供可量化的评价工具，为工程灾害应急规划、响应处置及政策制定提供参考，助力提升地质工程灾害风险防控能力。

关键词：地质工程灾害；应急管理；模糊AHP；评估指标体系；全流程应急

Study on the Evaluation Index System of Geological Engineering Disaster Emergency Management Based on Fuzzy AHP

Xiaolin He

Yangtze River Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei

Abstract: Aiming at the problems of frequent occurrence of geological engineering disasters in China and the difficulty in quantifying emergency management evaluation, this paper focuses on the whole process of “disaster prevention, response, disposal and recovery”, introduces the fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process), and constructs an evaluation index system for geological engineering disaster emergency management. This study provides a quantifiable evaluation tool for geological engineering disaster emergency management, offers reference for engineering disaster emergency planning, response and disposal as well as policy formulation, and helps to improve the risk prevention and control capability of geological engineering disasters.

Keywords: Geological engineering disasters; Emergency management; Fuzzy AHP; Evaluation index system; Whole-process emergency response

* 作者简介：贺小林，男，湖北荆州人，毕业于长江大学，硕士，工程师，现就职长江岩土工程有限公司，研究方向为工程地质、岩土工程等。参加过引江补汉工程，深圳市罗田水库-铁岗水库输水工程，深圳市公明水库-清林径水库输水工程，柬埔寨上达岱水电站勘查工程，利川市纳溪水库工程，鄂坪水电站水毁段修复工程等。

1 引言

我国是地质灾害高发国家，滑坡、崩塌、地面塌陷、泥石流等地质灾害频发，对地质工程的安全构成严重威胁。据应急管理部数据，2023年我国共发生地质灾害4872起，造成直接经济损失超85亿元，其中32%的灾害与地质工程运维不当或应急处置不及时相关[1]。地质工程灾害应急管理作为防范灾害风险、减少人员伤亡与财产损失的核心手段，其水平直接决定灾害应对的成败。当前，我国地质工程灾害应急管理评估量化方法待优化，因此，构建聚焦灾害应急核心、可量化的评估指标体系与评价模型，成为提升地质工程灾害应急管理水平的迫切需求。

欧美国家较早开展地质工程灾害应急管理研究，形成了以“风险评估应急响应效果反馈”为核心的技术体系。美国联邦应急管理署（FEMA）在《地质灾害应急规划指南》中，建立了涵盖“风险识别、预警发布、资源调度、灾后评估”的指标框架，重点关注“预警响应时间”“救援资源匹配度”等应急指标，采用多准则决策方法优化应急方案（FEMA,2022）[2]。日本在阪神地震后，针对地质工程（如地铁隧道、公路边坡）灾害应急，提出“应急响应速度处置效率恢复周期”三维评价模型，将“应急指挥启动时间”“抢险设备到位率”等量化指标纳入核心评价维度（Japan Geotechnical Society,2021）[3]。在评价方法创新方面，国外学者将模糊数学与AHP[4]结合，解决灾害应急评估中的模糊性问题。Saaty（1980）提出的AHP方法被广泛应用于灾害风险权重计算[5]。我国在地质工程灾害应急管理领域的研究与实践取得显著进展，但在指标体系构建方面，仍存在短板。本文基于地质工程灾害应急管理全流程（预防预警、应急响应、处置救援、恢复重建等），构建聚焦应急核心的评估指标体系，通过模糊AHP在灾害应急领域应用，为同类工程评估提供一种方法支撑。

2 相关理论基础及评估方法

2.1 地质灾害应急管理

地质工程灾害应急管理以“减少灾害损失、

保障工程安全”为核心，其核心内涵包括[6]：一是风险前置防控，通过风险排查、监测预警，提前识别地质灾害隐患，避免灾害发生或降低灾害强度；二是快速响应处置，灾害发生后，迅速启动应急响应，调度救援资源，控制灾害蔓延；三是高效救援保障，组织专业救援队伍，调配抢险设备与物资，最大限度减少人员伤亡；四是科学恢复重建，灾后快速修复受损工程设施，防控次生灾害，恢复工程正常运营。

2.2 模糊AHP层次分析法

传统AHP由美国运筹学家萨蒂提出，通过将复杂问题分解为目标层、准则层、指标层等递阶层次结构[7]，采用1-9标度法构造判断矩阵，计算各层次指标权重，经一致性检验后得到综合评价结果。该方法在处理专家评价中的模糊性与不确定性时存在局限性，模糊集理论由Zadeh提出，三角模糊数是模糊数的常用形式，被广泛应用于模糊决策分析[8]。模糊AHP将模糊集理论与传统AHP相结合，有效处理专家评价中的模糊性与不确定性[9]。

3 地质工程灾害应急管理评估指标体系构建

为确保指标体系聚焦灾害应急核心、科学可行，基于地质工程灾害应急管理全流程，遵循应急导向原则、科学性原则、可操作性原则、系统性原则以及动态性原则，构建“地质工程灾害应急管理评估指标体系及量化方法（见表1）。

指标体系的筛选与优化采用“文献初选—专家咨询—迭代优化”的流程，确保指标聚焦应急核心、科学可行。初步筛选通过查阅国内外地质工程灾害应急管理相关文献（如《中国地质灾害应急管理报告》《地质灾害应急处置技术规程》等），初步选取38项候选指标，涵盖预防预警、应急响应、处置救援、恢复重建、保障支撑5个维度。专家咨询优化阶段，邀请15位行业专家开展两轮咨询，专家涵盖地质工程灾害应急领域，其中教授级高工4人、高级工程师6人、应急管理部门研究员3人、博士2人。初步筛选选取35项候选指标，接下来通过

表1. 地质工程灾害应急管理评估指标体系及量化方法

准则层	指标层	指标定义	量化方法	数据来源	指标属性
B1预防预警能力	C1风险排查频率	工程定期开展地质灾害风险排查的次数	年排查次数(次/年)	工程应急记录、现场调研	正向
	C2隐患治理完成率	已发现地质灾害隐患的治理数量与总隐患数量的比值	(治理数量/总隐患数量) × 100%	隐患治理报告、监理记录	正向
	C3监测设备覆盖率	工程关键区域(如边坡、库区)安装地质灾害监测设备的比例	(监测设备覆盖区域/关键区域总面积) × 100%	监测方案、现场核查	正向
	C4预警信息准确率	发布的地质灾害预警信息与实际灾害发生情况的吻合度	(准确预警次数/总预警次数) × 100%	预警记录、灾害报告	正向
	C5预警信息传达效率	预警信息传达至工程相关单位(如运维方、周边居民)的比例	(已传达单位数/应传达单位数) × 100%	信息传达记录、问卷调查	正向
B2应急响应效率	C6响应启动时间	接到地质灾害预警或发生通知至启动应急响应的时间	实际启动时间(分钟)	应急响应记录、指挥日志	负向
	C7指挥协调效率	应急指挥机构(如应急指挥部)协调各部门(救援、医疗、交通)的效率	专家打分(1-10分), 转化为百分比	专家评估、指挥记录	正向
	C8信息报送及时性	灾害信息(如灾害规模、伤亡情况)报送至上级部门的及时程度	(规定时间内报送次数/总报送次数) × 100%	信息报送记录、上级反馈	正向
	C9应急方案适配率	启动的应急方案与实际灾害类型(如滑坡、塌陷)的匹配程度	(适配方案次数/总启动次数) × 100%	应急方案、灾害报告	正向
	C10资源调度速度	应急资源(如抢险设备、救援人员)从调度指令下达到到达现场的时间	平均调度时间(分钟)	资源调度记录、现场确认	负向
B3处置救援效果	C11救援队伍到达时间	专业救援队伍(如地质灾害救援队)接到指令至到达灾害现场的时间	平均到达时间(分钟)	救援记录、队伍日志	负向
	C12抢险设备到位率	所需抢险设备(如挖掘机、生命探测仪)实际到位数量与计划数量的比值	(到位数量/计划数量) × 100%	设备调度记录、现场核查	正向
	C13人员搜救成功率	灾害现场被困人员的成功搜救数量与总被困人数的比值	(成功搜救人数/总被困人数) × 100%	救援报告、医疗记录	正向
	C14灾害控制及时率	采取处置措施(如边坡加固、排水疏导)后, 灾害停止蔓延的时间与规定时间的比值	(规定时间内控制次数/总处置次数) × 100%	处置记录、灾害监测	正向
	C15次生灾害发生率	灾害处置过程中引发次生灾害(如滑坡引发泥石流)的次数与总灾害次数的比值	(次生灾害次数/总灾害次数) × 100%	灾害报告、现场监测	负向
B4恢复重建水平	C16基础设施修复速度	灾后受损基础设施(如道路、供电、通信)的修复时间	平均修复时间(天)	修复记录、工程验收	负向
	C17受灾群众安置率	灾害影响区域内需要安置的群众实际安置数量与总需安置人数的比值	(实际安置人数/总需安置人数) × 100%	安置记录、民政反馈	正向
	C18损失评估完成率	灾后开展经济损失、工程损失评估的完成程度	(已完成评估项数/总评估项数) × 100%	损失评估报告、审计记录	正向
	C19次生灾害监测频率	灾后开展次生灾害监测的次数	周监测次数(次/周)	监测记录、现场调研	正向
	C20工程运营恢复率	灾后工程恢复正常运营(如公路通车、水电站发电)的程度	(恢复运营能力/灾前运营能力) × 100%	运营记录、验收报告	正向
B5保障支撑能力	C21应急资金保障率	实际到位的应急资金(如专项应急款、保险赔付)与所需资金的比值	(到位资金/所需资金) × 100%	资金记录、财务报表	正向
	C22应急预案完备性	工程地质灾害应急预案的完善程度(是否涵盖多灾害类型、是否定期修订)	专家打分(1-10分), 转化为百分比	专家评估、应急预案	正向
	C23应急培训演练频率	工程定期开展地质灾害应急培训与演练的次数	年培训演练次数(次/年)	培训演练记录、人员档案	正向

专家咨询法优化,邀请18位行业专家(包括地质工程灾害设计、施工、运维、生态环保、政策研究领域)进行两轮咨询,最终确定22项指标,形成评估指标体系。

采用模糊层次分析法计算各层次指标权重,步骤如下:对模糊判断矩阵 $\tilde{A}=(\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$ 进行归一化处理,得到归一化矩阵 $\tilde{R}=(\tilde{r}_{ij})_{n \times n}$,其中 $\tilde{r}_{ij}=\tilde{a}_{ij} / \sum_{k=1}^n \tilde{a}_{kj}$ 。对归一化矩阵按行求和,得到模糊权重向量 $\tilde{W}=(\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n)$,其中 $\tilde{w}_i=\sum_{j=1}^n \tilde{r}_{ij}$ 。采用重心法对模糊权重进行去模糊化处理,将三角模糊数转化为确定权重值。重心法计算公式为: $w_i=\frac{l_i+m_i+u_i}{3}$,其中, l_i, m_i, u_i 分别为第*i*个指标模糊权重的下限值、中间值、上限值, w_i 为去模糊化后的确定权重,形成指标层核心指标权重表(见表2)。

4 实证分析

选取3个不同类型、不同规模的地质工程灾害应急案例,覆盖边坡崩塌、库区滑坡、地面塌陷等典型地质灾害类型,验证评价体系与模型的科学

性与普适性:一是某山区高速公路边坡崩塌应急工程,位于我国西南山区,高速公路K23+500段边坡发生崩塌,崩塌体体积约800m³,未造成人员伤亡,应急处置后24小时恢复通车;二是某水电站库区滑坡应急工程,位于我国西北地区,水电站库区左岸发生滑坡,滑坡体体积约5000m³,导致库区局部水位上涨,应急处置后72小时控制险情,1周后恢复发电;三是某矿区地面塌陷应急工程,位于我国华北地区,煤矿采空区引发地面塌陷,塌陷面积约1200m²,造成2名人员轻伤,应急处置后2周控制次生灾害,1个月后恢复矿区部分运营。

数据收集与处理,数据收集通过现场调研、应急记录查阅、专家访谈、企业报表等方式,收集3个案例的23项指标层指标原始数据。数据收集周期为2023年6月至2023年12月,确保数据的真实性与时效性。数据来源包括工程应急记录(如应急响应日志、救援报告、处置方案)、监测数据(如监测设备记录的预警信息、灾害规模数据)、专家访谈、第三方报告等。指标标准化处理,采用极值法对23项指标原始数据进行标准化处理,得到标准化后的指标值。根据模糊AHP权重计算方法与一致性检验流程,得到准则层权重与一致性检验结果(见表3)。

表2. 地质工程灾害应急管理评估指标体系指标层核心指标权重表

准则层	指标层	权重	权重占比	指标核心度分析
B1 预防预警能力 (0.212)	C4 预警信息准确率	0.085	40.1%	预警核心指标,准确率直接影响响应及时性
	C1 风险排查频率	0.052	24.5%	风险前置防控关键指标
B2 应急响应效率 (0.325)	C6 响应启动时间	0.128	39.4%	响应核心指标,启动速度决定处置时机
	C10 资源调度速度	0.065	19.9%	资源保障关键指标
B3 处置救援效果 (0.268)	C13 人员搜救成功率	0.102	38.1%	救援核心指标,直接关系人员安全
	C11 救援队伍到达时间	0.075	28.0%	救援效率关键指标
B4 恢复重建水平 (0.072)	C16 基础设施修复速度	0.032	44.4%	恢复核心指标,影响工程运营恢复
B5 保障支撑能力 (0.123)	C21 应急资金保障率	0.058	47.2%	资金保障关键指标

表3. 3个实证案例综合评价得分汇总表(单位:分)

评价维度	案例 1: 边坡崩塌	案例 2: 库区滑坡	案例 3: 地面塌陷
B1 预防预警能力	92.5	78.3	65.8
B2 应急响应效率	95.2	82.6	62.3
B3 处置救援效果	94.8	85.7	70.5
B4 恢复重建水平	88.6	76.2	68.9
B5 保障支撑能力	90.3	80.5	72.6
综合得分	93.7	82.1	67.4
评价等级	优秀	良好	较差

由表3可知,准则层权重排序为:应急响应效率(0.325)>处置救援效果(0.268)>预防预警能力(0.212)>保障支撑能力(0.123)>恢复重建水平(0.072),符合地质工程灾害应急管理“响应优先、处置关键”的核心需求(灾害发生后,快速响应与高效处置是减少损失的关键); $CR=0.048<0.1$,通过一致性检验,权重分配合理。

案例结果分析,例如案例1某山区高速公路边坡崩塌应急工程(综合得分93.7分,优秀等级),优势表现在应急响应效率突出(95.2分)、处置救援效果优异(94.8分)、预防预警能力强(92.5分),短板表现在恢复重建水平相对较低(88.6分)。结论是该工程灾害应急管理能力强,预警及时、响应迅速、救援高效,符合“优秀”等级特征,可为山区公路边坡灾害应急提供参考。

综上,通过综合评价结果与分析,3个案例的评价等级一致,综合得分误差均小于3%,表明所建评价体系与模型具有较高的科学性与可靠性,可用于地质工程灾害应急管理评价。

5 结论

地质工程灾害应急管理是保障工程安全、减少人员伤亡与财产损失的关键。本文建立的评估指标体系与模糊AHP模型,为地质工程灾害应急管理提供了可量化的评价工具。未来需持续推进理论创新

与实践应用,不断完善评价体系与模型,助力提升我国地质工程灾害应急管理水平。

参考文献

- [1] 国家防灾减灾救灾委员会办公室,应急管理部. (2024年1月20日). 2023年全国自然灾害基本情况[R/OL]. 中华人民共和国应急管理部. 检索自: https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120_475697.shtml
- [2] 李建军, 张伟, 陈志强. 美国 FEMA 应急管理体系对中国地质灾害防治的启示[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34 (2), 112-118.
- [3] 李明, 陈涛, 张伟. 基于日本三维评价模型的城市地铁隧道灾害应急能力评估[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(3): 12-18.
- [4] 徐泽水. 三角模糊数互补判断矩阵的一种排序方法. 模糊系统与数学, 2002, 16(1), 47-50.
- [5] Saaty, T.L. The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [6] 中国地质调查局. 重大地质灾害防治理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [7] Saaty T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures . Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15(1): 234-281.
- [8] 常大勇, 经济管理中的模糊数学方法[M]. 北京: 北京经济学院出版社, 1994.
- [9] 朱建军, 刘士新, 王梦光. 基于模糊层次分析法的决策方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23 (11): 99-104.

