

徐兴华, 唐小明, 游省易, 等. 东南沿海山区小流域突发地质灾害动态风险评价与应急预案[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 78-85, 92. [XU Xinghua, TANG Xiaoming, YOU Shengyi, et al. Dynamic risk assessment and emergency warning for sudden geological disasters in small watershed of southeastern coastal mountainous area[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(4): 78-85, 92. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.04.015.]

东南沿海山区小流域突发地质灾害动态风险 评价与应急预案*

徐兴华, 唐小明, 游省易, 冯杭建

(浙江省地质矿产研究所, 浙江 杭州 310007)

摘 要: 降雨作用下山区小流域突发地质灾害动态风险评价与应急预案是值得探讨的研究课题。选择浙中丘陵区衢江区铜山源典型小流域为研究区, 基于风险评价理论和模糊数学方法, 构建降雨作用下山区小流域突发地质灾害动态风险预警模型, 以典型代表性降雨事件为实例, 以动态风险水平为预警判据, 开展研究区地质灾害动态风险评价, 指导区域地质灾害应急防灾。实例验证表明: 在“2011·6·19”代表性降雨事件下, 研究区地质灾害动态风险水平划分为极低、低和中3级区, 对应于应急预案Ⅴ级、Ⅳ级和Ⅲ级区, 以此有效指导分区地质灾害应急处置和防灾; 而且经实际地质灾害发生情况检验与验证, 本次新发生点位于地质灾害动态风险中级(应急预案Ⅲ级)区, 可见动态风险水平分区评价是合理可靠的; 通过降雨作用下山区小流域突发地质灾害动态风险评价可以有效指导区内地质灾害应急预案和防灾处置, 具有积极的指导和实践意义。

关键词: 山区小流域; 地质灾害; 动态风险; 应急预案; 东南沿海

中图分类号: P642; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)04-0078-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.04.015

我国东南沿海地区属亚热带季风气候区, 常遭梅雨和台风暴雨影响, 降雨强度大、雨量集中、持续时间长, 山区小流域多发、群发和易发滑坡、泥石流等灾害, 造成重大人员伤亡和经济损失。据已有资料统计, 2008-2010年浙江省受极端降雨天气影响频率较高, 受灾严重, 期间山区小流域突发地质灾害1 012处, 其中滑坡581处、泥石流125处, 造成61人伤亡, 直接经济损失达1.61亿元^[1-2]。

通过山区小流域突发地质灾害动态风险评价和应急预案以指导地质灾害应急处置是值得考虑的课题。地质灾害风险评价是自然灾害风险研究的内容之一, 是考虑地质环境因素、资源社会情况等综合评价的过程^[3-5], 目前多用于城镇规划、工程建设及防灾减灾等领域^[6-8], 其相关实践应用反映基于静态过程, 只考虑地质环境条件和资源经济情况等因素^[9-11]。地质灾害应急是地质灾害防治“四大体系”之一, 通过系统性的应急响应理论、技术方法等, 应对地质灾害, 减轻危害^[12-13]。但是, 针对降雨条件下的突发地质灾害动态风险评价较少有相关研究涉及, 及与其相关的应急预

警也未有较多研究开展。本文针对东南沿海山区小流域地质环境特色, 对降雨作用下山区小流域突发地质灾害动态风险评价与应急预案做进一步地探索和研究。选择典型小流域作为研究区, 构建降雨作用下的突发地质灾害动态风险预警模型, 建立评价指标体系, 确立模糊数学理论和耦合权重计算确定的分析模式方法, 建立统一降雨强度预警指标, 以典型代表性降雨事件展开研究区小流域地质灾害动态风险评价与应急预案研究, 有效指导区内地质灾害应急防灾, 以此提供可靠的解决方案和技术平台。

1 研究区域

位于东南沿海浙江省浙中山地丘陵区的衢州市衢江区^[14]是典型的山地县(市、区), 全区以山地丘陵为主, 约占总面积的80.0%, 整体呈南北高、中间低, 中部为河谷平原, 海拔约50~120 m, 向南北两侧以阶梯状抬升, 分别逐步过渡到海拔500~1 000 m的低山区和海拔大于1 000 m的中山区。

* 收稿日期: 2018-03-21

修回日期: 2018-05-25

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201211055); 浙江省公益技术应用研究科技计划项目(2017C33011)

第一作者简介: 徐兴华(1983-), 男, 江苏常州人, 博士, 高级工程师, 主要从事地质灾害综合防治研究工作。

E-mail: xuehua-11@163.com

表 1 研究区地质灾害隐患基本情况一览表

项目	类型	规模等级			稳定性或易发程度		发生时间			危害程度		
		小型	中型	大型	较差	中易发	梅雨期	台风雨期	其它	一般级	较大级	重大级
滑坡隐患/处	18	18	/	/	18	/	15	8	7	13	5	/
泥石流隐患/处	12	7	4	1	/	12				/	11	1
合计	30	25	4	1	18	12	30			13	16	1

本区属梅雨、台风雨兼容区,多年平均降雨量在 1 500~2 100 mm 之间,由中间向南北两侧山区逐渐递增,在双桥、洋口形成区域降雨中心,每年的 6~7 月中旬为梅雨期,7 月中旬至 9 月中旬为台风雨期,汛期雨量占全年的 70% 以上,常常出现日降雨量大于 50 mm 甚至 100 mm 以上的灾害性降雨天气,山区小流域易发滑坡、泥石流等地质灾害。

选择衢江区北部山区铜山源小流域作为典型研究区(图 1),其属衢江支流,由银坑溪和庙前溪在杜泽北部注入铜山源水库,向南流经杜泽至高家等地,在章德埠注入衢江,全长 45.1 km,河道比降 4.1‰,流域面积 247.6 km²。区内有双桥、杜泽等 8 个乡镇 81 个行政村和省属十里丰监狱,人口有 2.96 万户、9.84 万人,农民人均收入约 7 720 元。



图 1 研究区交通位置图(红色标记区)

根据全区地质灾害调查评价资料总结^[14-15],铜山源小流域研究区分布地质灾害隐患共计 30 处,主要分布于双桥、太真、杜泽、周家等地,已发生的有 25 处(表 1 和图 2),基本特点主要如下。



图 2 铜山源小流域典型研究区

(1)地质灾害类型方面,研究区分布滑坡隐患 18 处,占总数的 60.0%,规模等级以小型为主,稳定性以较差为主;泥石流隐患 12 处,占总数的 40.0%,规模等级以中、小型为主,大型仅 1 处,易发程度以中易发为主。

(2)发生时间方面,主要集中于 6~7 月中旬的梅雨期和 8 月中旬~9 月中旬的台风雨期,以 6 月份的梅雨暴雨期为多,达 15 处,8 月份的台风暴雨期有 8 处。

(3)危害程度方面,以较大级为主,有 16 处,占总数的 53.3%,又以泥石流灾害最多,有 10 处;一般级次之,有 13 处,占总数的 43.3%,重大级仅 1 处;滑坡危害等级以一般级为主,较大级有 5 处,泥石流危害等级以较大级为主,重大级仅 1 处。

总体而言,铜山源小流域内地质灾害类型以滑坡、泥石流为主,且以滑坡为多,规模等级以中、小型为主,稳定性以较差和中易发为主,是以梅雨期和台风雨期的持续降雨或集中强降雨作用诱发所致,灾害危害等级以较大级为主,威胁村庄人口生命财产安全的主要集中于泥石流灾害。

2 降雨作用下动态风险预警模型构建

2.1 基本体系结构

基于铜山源小流域地质环境条件,依据区内滑坡、泥石流地质灾害持续强降雨引发、规模小、数量多、群发性、突发性等特点,结合降雨特征研究,细化落实村庄、人口、土地、基础设施、经济价值等社会基础资料,构建降雨诱发的山区小流域突发地质灾害动态风险预警模型(图 3),主要过程如下。

(1)基于小流域下垫面地质环境条件、诱发影响因素和地质灾害隐患分布情况,结合降雨预警阈值指标,基于 GIS 平台,采用模糊数学理论和构建预警关系矩阵,进行降雨诱发突发地质灾害的动态危险性评价,综合计算危险性指数,分析整体危险程度和发展趋势,并确定其发生的可能性概率。

(2)根据小流域村庄、土地等基本情况,以承灾体为标准,细化分布村庄建筑、人口分布、土地利用、基础设施和经济价值等基础数据,通过统计分级,进行因素指标属性赋值,采用综合指数方法,进行地质灾害易损性评价,确定其易损性指数。

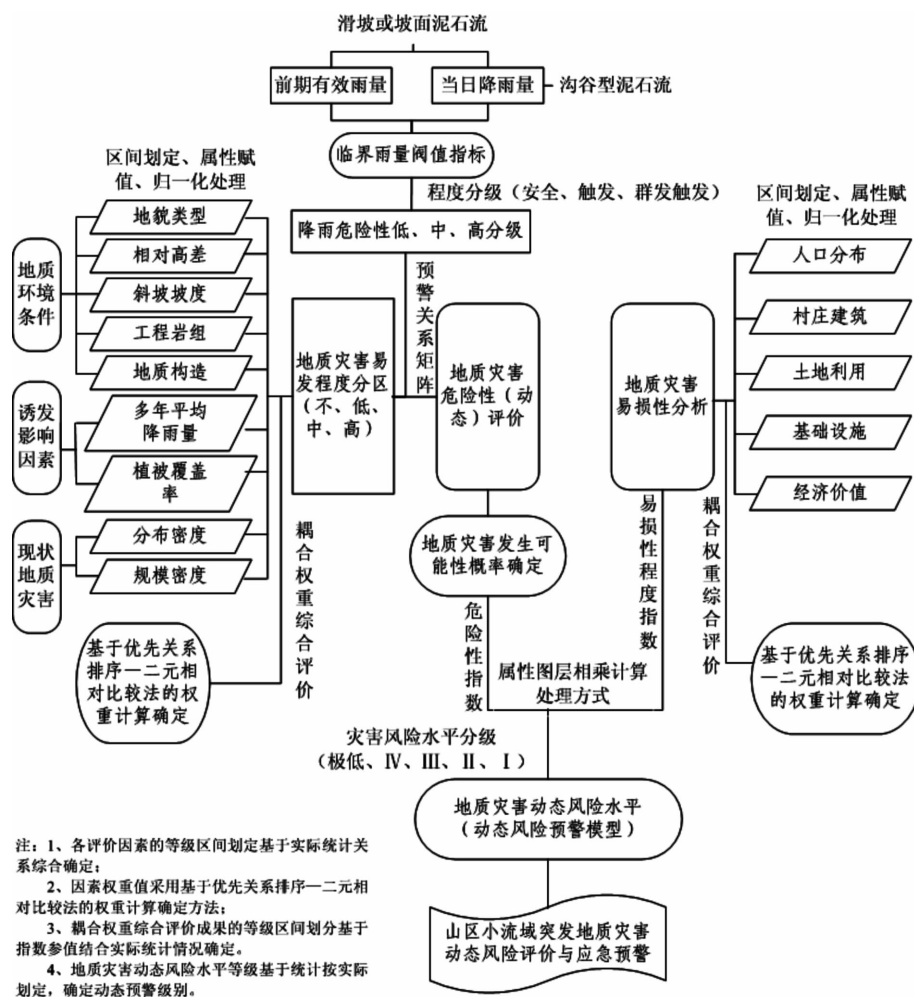


图3 模型基本结构体系

(3) 基于灾害风险评价理论，依据地质灾害动态危险性指数和易损性指数，采用因子属性值相乘的方法，进行降雨作用下区域地质灾害动态风险评价，建立以地质灾害风险水平为阈值的预警判据，建立降雨诱发地质灾害的动态风险预警模型，明确不同风险水平启动相应层级的应急预警机制。

2.2 评价指标体系

2.2.1 易发程度评价指标体系

根据研究区所在的浙江省山区县(市)乡(镇)地质灾害分布与易发区图编制和监管的相关要求^[16]，并参照有关成果总结资料^[17]，针对研究区地质灾害易发程度以不、低、中、高分区，分为四级。

(1) 地质环境条件

①高差： $< 50\text{ m}$ 、 $50 \sim 150\text{ m}$ 、 $300 \sim 500\text{ m}$ 、 $150 \sim 300\text{ m}$ ；②斜坡坡度： $5^\circ \sim 15^\circ$ 、 $> 55^\circ$ 、 $15^\circ \sim 35^\circ$ 、 $35^\circ \sim 55^\circ$ ；③工程岩组： $(T_c, T_{cc}, L_t, SR_f, SR_c), (R_r, S_c, B_g), (S_f), (Q_g)$ ；④地质构造：断裂密度 (m/km^2) ， $50 \sim 250$ 、 $250 \sim 500$ 、 $500 \sim 750$ 、 $750 \sim 1\,000$ 。

(2) 诱发影响因素

①多年平均降雨量： $< 1\,700\text{ mm}$ 、 $1\,700 \sim 1\,800\text{ mm}$ 、 $1\,800 \sim 2\,000\text{ mm}$ 、 $> 2\,000\text{ mm}$ ；②植

被发育与破坏： $< 20\%$ 、 $20\% \sim 40\%$ 、 $40\% \sim 60\%$ 、 $60\% \sim 80\%$ 。

(3) 现状地质灾害

①分布密度 $(\text{处}/\text{km}^2)$ ： $0 \sim 0.05$ 、 $0.05 \sim 0.15$ 、 $0.15 \sim 0.30$ 、 $0.30 \sim 0.50$ ；②规模密度 (m^3/km^2) ： $0 \sim 100$ 、 $100 \sim 1\,000$ 、 $1\,000 \sim 5\,000$ 、 $5\,000 \sim 15\,000$ 。

2.2.2 易损性评价指标体系

以承灾体为标准，基于自有属性和信息不完备条件^[3-4,9]，确立评价指标体系如表2所示，主要包括人口分布、村庄建筑、土地利用(主要是耕地丰度)、基础设施(主要是公路交通设施)和经济价值(主要是工农业产值)，均结合实际统计分级。

2.3 模型理论基础与实现过程

2.3.1 基于耦合权重确定方法的危险性动态评价

首先，建立反映地质灾害易发程度分区的评价集，即不易发 (E_I) 、低易发 (E_{II}) 、中易发 (E_{III}) 和高易发 (E_{IV}) ，以单个网格单元为评价单元，基于模糊数学理论^[18]，采用滑坡治理稳定状态综合评价过程建立的耦合权重计算确定方法^[19]，建立其各类因子的隶属度矩阵和权重矩阵，确定其结果集为

表 2 承灾区易损性指数关系表

待定指数	人口密度/ (人/km ²)	建筑密度/ (×10 ⁴ m ² /km ²)	耕地丰度/%	公路密度/ (km/km ²)	工农产值/ (万元·年/km ²)
9	>700	>15	>75	>5.0	>500
7	450~700	10~15	40~75	2.0~5.0	200~500
5	250~450	5~10	20~40	1.0~2.0	100~200
3	100~250	1~5	5~20	0.1~1.0	10~100
1	<100	<1	<5	<0.1	<10

$$V = A \cdot R = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \cdots \quad \alpha_n] \cdot \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{14} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{24} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{n4} \end{bmatrix} =$$

$$[\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \cdots \quad \lambda_4]. \quad (1)$$

式中: $A = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \cdots \quad \alpha_n]$ 是各类评价因子的权重矩阵, 且满足总和为 1; n 表示评价因子的个数; R 为评价因子的隶属度矩阵; μ_{n4} 表示的是各类评价因子相应于分区的隶属度值。

依据最大隶属度准则^[18]确定地质灾害易发程度区间, 基于评价结果集 $[\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \cdots \quad \lambda_4]$, 其对应易发程度 $\{E_I、E_{II}、E_{III}、E_{IV}\}$, 则评价结果为

$$\lambda_{\max} = \max\{\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_4\}. \quad (2)$$

可见 λ_{\max} 所对应的等级区间即为地质灾害易发程度分区。在确定所有评价网格单元所处易发程度分区的基础上, 结合其分区属性, 经综合评价分析, 进行全区地质灾害易发程度并区勾绘且核实。

其次, 基于降雨过程实测雨量构建降雨量临界阈值指标, 由当日雨量和前期有效雨量(有效降雨量)构成, 分析降雨引发滑坡、泥石流地质灾害的对应关系, 综合确定与地质灾害发生的关系限值, 进行降雨危险性程度等级划分, 分低(安全雨情)、中(激发雨情)、高(群发激发雨情)3 级。

最后, 基于地质灾害易发程度分区, 结合降雨危险性程度分级, 参照有关危险性分析的成果资料^[3-4,9], 结合实际分析降雨激发地质灾害的耦合作用关系, 构建预警关系矩阵(表 3), 实现地质灾害危险性动态评价, 分极低、I、II、III、IV 等级别。

表 3 预警关系矩阵划分表

易发程度	降雨等级		
	低	中	高
不	极低	极低	I
低	极低	I	I
中	I	II	III
高	II	III	IV

注: 无降雨发生时, 针对所有易发区都为极低危险性级别。

2.3.2 地质灾害易损性分析

首先, 依据地质灾害易损性评价指标体系, 基于评价网格单元, 对各评价因素指标进行分指数赋值, 对其进行归一化处理(介于 0~1), 计算式为

$$X(i) = \frac{x(i) - \min[x(i)]}{\max[x(i)] - \min[x(i)]}. \quad (3)$$

式中: $X(i)$ 为某评价因子层中第 i 个网格单元经数据归一化处理的值; $x(i)$ 为第 i 个网格单元的待定分指数值, $\max[x(i)]$ 为所有评价网格单元中的最大值; $\min[x(i)]$ 为所有评价网格单元中的最小值。

其次, 针对体现承灾区抗灾特性的各评价因素层, 基于数据归一化处理的参数属性值, 结合耦合权重确定方法计算的各评价因素的权重值^[19], 采用综合指数法确定地质灾害易损性指数值, 为

$$Z = \sum_{j=1}^5 A_j \cdot X_j. \quad (4)$$

式中: Z 为某评价网格单元的易损性指数值; A_j 为其对应第 j 个评价因子的权重值; X_j 为其对应第 j 个评价因子的参数属性值(已经数据归一化处理); j 为其对应评价因子的个数, $j=1, 2, \cdots, 5$ 。

最后, 根据地质灾害易损性指数值, 采用修正的自然断点法^[3-4,9]进行其程度分级, 依据指标值区间范围, 分极低、低、中、高易损性区域(表 4), 再基于所有评价网格单元进行区域易损性分区。

表 4 承灾区易损性分区分级表

易损性程度	高	中	低	极低
易损指数值	1.00~0.75	0.75~0.35	0.35~0.10	0.10~0.00

2.3.3 地质灾害动态风险评价

基于灾害风险评价基本理论^[3-4,9], 以地质灾害危险性动态评价结果以及易损性评价结果为基础, 计算分析地质灾害风险指数, 确定动态风险水平。

首先, 根据地质灾害危险性动态评价分析结果, 结合实际统计分级情况, 采用修正的自然断点法, 确定地质灾害发生的可能性概率 P (表 5)。

表 5 地质灾害发生概率对应表

危险性程度	极低	I	II	III	IV
可能性 概率 $P/\%$	<1	1~10	10~40	40~60	60~80

表 6 地质灾害动态风险水平分级标准

动态风险水平	<0.05	0.05~0.10	0.10~0.18	>0.18
风险性程度	极低风险性(Ⅴ)	低风险性(Ⅳ)	中风险性(Ⅲ)	高风险性(Ⅱ)

注：动态风险水平在 0.25 以上时，可进一步划分为极高风险性(Ⅰ)。

表 7 地质灾害动态风险与应急预警关系表

动态风险等级	地质灾害发生情况	预警级别	应急处置和防灾措施
极低(Ⅴ级)区	发生地质灾害的可能性很小，一般呈无雨或受少雨、小雨影响。	Ⅴ级(无)	不采取措施。
低(Ⅳ级)区	发生地质灾害的可能性较小，一般受多雨影响，或有小型地质灾害。发生或存在潜在一般级险情。	Ⅳ级(◆)	提醒关注降雨情况；启动群测群防体系，巡查重要地质灾害隐患；若有灾害发生，及时组织应急小组赶赴现场，提出应对措施，防止灾情或险情扩大。由区本级为主。
中(Ⅲ级)区	发生地质灾害的可能性中等，一般受暴雨影响，有小型或有中型地质灾害，有多点发生的可能。发生或存在潜在较大级险情。	Ⅲ级(◆)	密切注意降雨情况；启动群测群防体系，开展易发区和重要隐患巡查，采取防御措施；组织应急小组赴现场落实方案；划定危险区和设置警示标志，确定预警信号和撤离路线；密切关注灾害发展，提出对策，做好受威胁群众避让撤离准备。必要时提请市局派出应急工作组。
高(Ⅱ级)区	发生地质灾害的可能性大，一般受连续强降雨或大暴雨影响，地质灾害多点群发，有中型或有大型地质灾害。发生或存在潜在重大级险情。	Ⅱ级(◆)	做好降雨实时监测和预报，值班人员准备应急；启动群测群防体系，开展易发区和重要隐患巡查监测，采取防御措施；组织应急工作组及专家赶赴现场应急处置，组织和落实应急方案和措施；划定地质灾害危险区和设置警示标志，确定预警信号和撤离路线；启动应急预案，根据实际提出应急对策，做好应急求援准备，情况危急时组织避让和撤离。必要时提请省厅派出应急工作组。
极高(Ⅰ级)区	发生地质灾害的可能性很大，一般受台风暴雨或特大暴雨影响，地质灾害多点群发，有中到大型地质灾害。发生或存在潜在特大级险情。	Ⅰ级(◆)	做好降雨连续监测和预报，所有人员展开应急；密切注意地质灾害隐患发展，开展监测预警，随时掌握具体情况；组织应急工作组及专家赶赴现场应急处置，组织应急工作，落实应急措施；启动应急预案，制定科学应急对策，组织受灾群众及时避让和撤离；做好应急资源调配，管制道路交通，应急救援队伍随时待命，展开抢险救援工作。必要时提请国土资源部派出应急工作组。

其次，再叠合地质灾害易损性指数值，利用评价网格单元划分的方式，采取属性值相乘的分析方法，综合确定地质灾害动态风险指数，为

$$F_i = P_i \times Z_i. \tag{5}$$

式中： F_i 为第 i 个评价单元的地质灾害风险指数值； P_i 为第 i 个评价单元的地质灾害危险性概率； Z_i 为第 i 个评价单元的地质灾害易损性指数值。

地质灾害动态风险指数值介于 0~1 之间，结合实际分析情况采用修正的自然断点法^[3-4,9]，进行动态风险水平分级，按照等级区间范围差异，分成极低、低、中和高风险区(或极高风险区)(表 6)，从而确定以动态灾害风险水平为阈值的预警判据，建立山区小流域突发地质灾害动态风险预警模型。

2.4 动态风险水平分区与应急预警

根据《国家突发地质灾害应急预案》^[13]，并通过已有相关应急成果资料^[20-21]的总结和深化，探索提出适合山区小流域环境特色的能满足不同地质灾害风险水平启动相应层级的应急预警响应机制与联动模式，区内地质灾害动态风险与应急预

警的联动关系如表 7 所示，根据地质灾害动态风险水平的不同，建立相应层级的地质灾害应急预警级别，确定具体的地质灾害应急处置和防灾措施，为地质灾害防灾提供决策依据和技术支持。

3 降雨强度预警指标

3.1 理论计算公式

结合研究区历史泥石流灾害资料和降雨过程雨量信息，针对流域形态显著且纵坡降较大的沟谷型泥石流，根据相关技术规范^[22]，结合降雨基本特征，建立泥石流降雨监测预警暴雨强度指标为：

$$R = \mu (H_{24h}/100 + H_{1h}/40). \tag{6}$$

式中： μ 是前期降雨量修正系数，无前期降雨时 μ 取 1，有前期降雨时 μ 一般取 1.1~1.2； H_{24h} 是 24 h 最大降雨量(mm)； H_{1h} 是 1 h 最大降雨量(mm)。

降雨激发滑坡(或坡面泥石流)发生的有效降雨量一般采用幂指数形式，以某段降雨过程的当

日降雨量各自乘以有效降雨系数再累积所得^[23]:

$$R_c = R_0 + \sum_{i=1}^n \alpha^i R_i \quad (7)$$

式中: R_c 是有效降雨量; R_0 是滑坡发生当日雨量; i 是滑坡发生前的天数计数; n 是滑坡发生前的天数; α 是有效降雨系数, 一般介于 0.70 ~ 0.80, 本区据实取 0.75; R_i 是滑坡发生前第 i 天的当日雨量。

通过典型代表性降雨事件激发滑坡地质灾害的实测过程降雨量统计, 滑坡地质灾害的形成主要与发生前 4 ~ 5 d 的降雨密切相关, 则上式中滑坡发生前的天数结合实际情况可取 4 ~ 5 d, 则适合本区降雨激发滑坡的有效降雨量值的理论计算公式为:

$$R_c = R_0 + \alpha^1 R_1 + \alpha^2 R_2 + \alpha^3 R_3 + \alpha^4 R_4 + \alpha^5 R_5 \quad (8)$$

式中: R_c 是有效降雨量; R_0 是滑坡发生时的当日降雨量; α 是有效降雨系数, 本区结合实际情况取 0.75; R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 是滑坡发生前第 1 d、第 2 d、第 3 d、第 4 d、第 5 d 的当日降雨量。

3.2 临界雨量阈值指标

根据铜山源小流域及其周边地区“2002·8·15”、“2010·6·18”、“2010·7·8”、“2011·6·15”等降雨事件, 建立临界雨量阈值与激发滑坡、泥石流地质灾害发生比例数之间的对应统计关系, 主要分析如下。

①在 $R_c > 195$ mm 及其以上时, 降雨激发更多群发性滑坡、泥石流灾害的发生, 且比例大幅提高, 约占总数的 70% 以上, 为群发激发雨情; 且在 $R_c > 230$ mm 时, 沟谷型泥石流激发比例大大提高, 约占泥石流总数的 90% 以上, 为其触发雨情, 可见降雨激发沟谷型泥石流的条件相对苛刻得多。

②在 $R_c = 125 \sim 195$ mm 时, 降雨激发多数滑坡地质灾害的发生, 约 25% ~ 30% 左右, 为激发雨情。

③在 $R_c \leq 125$ mm 时, 可见降雨将不足以或少有激发地质灾害的发生, 为安全雨情。

通过总结分析本区及附近降雨激发滑坡、泥石流的降雨事件以及地质灾害发生数量的对应统计关系(图 4), 基于统一的降雨预警指标体系, 确定降雨激发地质灾害的临界雨量阈值为 125 mm、195 mm, 且 230 mm 是激发沟谷型泥石流的雨量阈值。

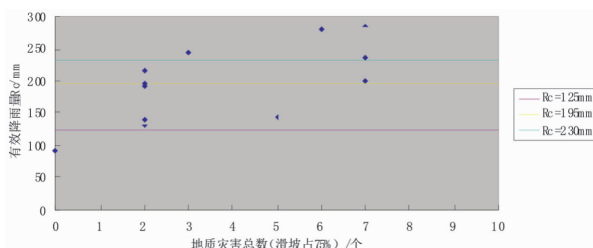


图4 临界降雨量与地质灾害发生的对应关系图

3.3 降雨危险性等级划分

通过降雨激发地质灾害的临界雨量阈值指标的分析 and 确定, 可将降雨量危险性等级划分为 3 级, 即低危险性、中危险性和高危险性, 分别对应 $R_c = 125$ mm 和 195 mm 两个临界雨量阈值(表 8)。

表8 降雨危险性等级划分

降雨量	危险性等级		
	低危险性	中危险性	高危险性
有效降雨量/mm	0 ~ 125	125 ~ 195	> 195

注: 有效降雨量在 230 mm 以上, 激发沟谷型泥石流的危险性更高。

4 研究区实例研究

4.1 基础数据来源

选择衢江区铜山源典型性小流域作为研究区, 以 ArcGIS10.0 平台和 Matlab7.1 程序为基础平台, 以“2011·6·19”代表性降雨事件^[15]为典型实例, 通过所构降雨型地质灾害动态风险预警模型, 开展山区小流域地质灾害动态风险评价与应急预案研究。

基础数据来源^[14-15]: ①1:10 000 数字化地形图; ②5 m 分辨率 DEM 数字高程模型; ③1:10 000 等高线、水系、交通线及各类注记等; ④1:10 000 乡镇、行政村、居民点境界线及标注; ⑤1:200 000 或 1:50 000 地层岩性、地质界线、构造等; ⑥滑坡、泥石流地质灾害隐患; ⑦最新二调土地利用数据; ⑧研究区及附近雨量站分布及实测过程雨量。

4.2 地质灾害动态危险性评价

首先, 根据地质灾害易发程度评价指标体系建立评价因素集, 结合实际以 100 m × 100 m 为基本评价网格单元, 通过模糊数学计算理论和耦合权重计算确定方法, 进行研究区地质灾害易发程度分区(图 5)。通过地质灾害爆发强度 S ^[24] 检验分区评价结果, 研究区地质灾害不、低、中至高易发区的爆发强度 S 指数是逐渐增大的, 说明分区是合理的。

其次, 结合本次“2011·6·19”降雨过程的实测雨量值, 根据临界雨量阈值确定方法和克里格数据插值方式, 生成全区有效降雨量分布图(图 6), 可知 R_c 在 110 ~ 191 mm 之间, 根据降雨危险性等级划分表, 确定全区降雨危险性程度划分为低和中 2 级区。

最后, 基于研究区地质灾害易发程度分区评价结果, 结合降雨危险性等级划分情况, 依据预警关系矩阵划分表(见表 3), 进行降雨激发地质灾害动态危险性评价(图 7)。

分析可知研究区地质灾害动态危险性划分成



图5 研究区小流域地质灾害易发程度分区图

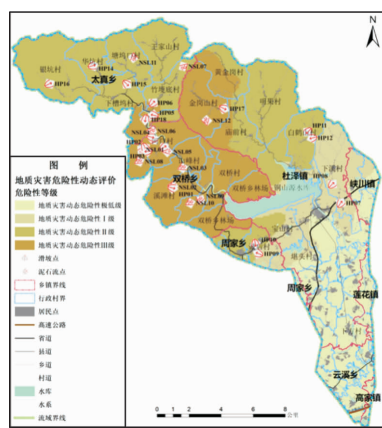


图7 研究区降雨激发小流域地质灾害动态危险性分区图

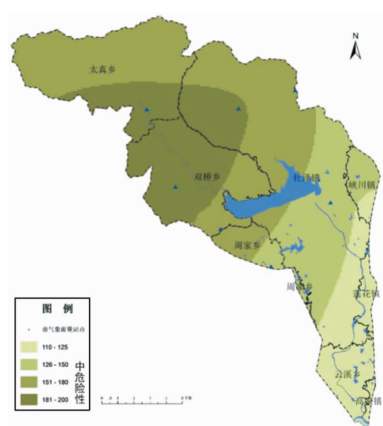


图6 研究区域有效降雨量等值线图

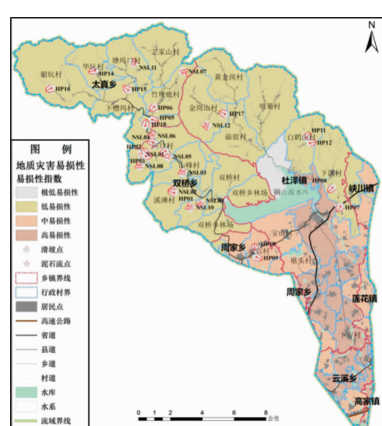


图8 研究区域地质灾害易损性分区图

极低、I、II、III级四级区,包括:①极低级区位于杜泽、峡川南部平原区及莲花、云溪、高家等平原区,面积约 50.50 km^2 ,占总面积的 22.16% ;②I级区位于铜山源水库、杜泽中部、峡川北部和周家南部丘陵区,面积约 31.7 km^2 ,占总面积的 13.91% ;③II级区位于太真(不含下槽坞)低山区、杜泽北部(不含庙前一金岗山—黄金岗一带)和周家北部低山丘陵区,面积约 86.40 km^2 ,占总面积的 37.91% ;④III级区位于太真南部(下槽坞)低山区、双桥、杜泽北部(庙前一金岗山—黄金岗一带)中低山区,面积约 59.30 km^2 ,占总面积的 26.02% 。

4.3 研究区易损性分析

以承灾体为标准,采用体现抗灾特性的村庄建筑、人口分布、土地利用、基础设施和经济价值等因素,通过实地调查、统计年鉴、政府公报等获取基础数据来源^[25],结合信息属性特征和政府管理需求,以登记在册的乡镇行政村为基本单位,依据地质灾害易损性分析模型体系和模式方法,基于评价网格单元,确定地质灾害易损性分区(图8)。

分析可知研究区地质灾害易损性分区如下:

①极低易损性区位于铜山源水库,面积约 12.0 km^2 ,约占总面积的 5.27% ;②低易损性区位于太

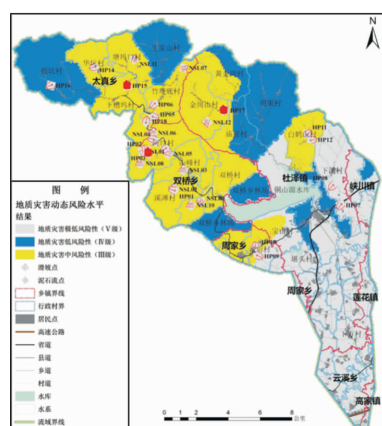


图9 研究区地质灾害动态风险水平分布图

真、双桥、杜泽及峡川北部山区,面积约 147.5 km^2 ,约占总面积的 64.72% ;③中易损性区位于杜泽及周家中部、峡川南部丘陵地区及莲花和云溪南部地区,面积约 34.6 km^2 ,约占总面积的 15.18% ;④高易损性区位于杜泽南部平原区、省属十里丰监狱和云溪北部地区,面积约 33.8 km^2 ,约占总面积的 14.83% 。

4.4 地质灾害动态风险评价和应急预警

基于降雨激发小流域地质灾害的动态危险性评

价以及易损性评价结果,依托降雨型地质灾害动态风险预警模型,确定全区地质灾害动态风险水平指数($F \in [0, 1]$),以其为预警阈值判据,进行地质灾害动态风险水平分区评价和应急预案(图9)。

本区地质灾害动态风险水平分区如下:①极低区(V级区)位于铜山源水库、杜泽下溪、宝山村一带及南部平原区、峡川(不含峡口村)、周家南部平原区及莲花、云溪、高家和十里丰监狱,面积约80.29 km²,占总面积的35.23%,地质灾害动态危险性以极低和低为主,风险水平极低,为应急预案V级区。②低级区(Ⅳ级区)位于太真王家山和银坑村、双桥林场、杜泽明果—黄金岗村一带、杜泽一至五村及峡川峡口村,面积约59.17 km²,占总面积的25.95%,地质灾害动态危险性以中等为主,易损性多为低级,风险水平低,为应急预案Ⅳ级区。③中级区(Ⅲ级区)位于双桥(不含林场)、太真(不含王家山和银坑村)、杜泽庙前—金岗山—黄金岗一带和白鹤山、宝山村一带及周家北部村,面积约88.48 km²,占总面积的38.82%,地质灾害动态危险性以高和中级为主,中低山至丘陵区易损性由低级至中等,风险水平中等,为应急预案Ⅲ级区。

4.5 实际地质灾害发生检验与验证

实际情况下,本次降雨过程中铜山源小流域新发生3处地质灾害^[15]:双桥乡田蓬村滑坡(HP03)、太真乡下槽坞村滑坡(HP15)、杜泽镇余家村滑坡(HP17),为小型岩土质滑坡,对照其所处位置,均落于地质灾害动态风险水平中级区(应急预案Ⅲ级区)(见图9红色标记点)。可见,地质灾害动态风险评价能有效覆盖或捕捉可能发生的点,说明本区评价结果是合理可靠的,能指导地质灾害应急。

地方国土部门对照动态风险预警联动关系表,根据雨情发布预警信息,启动群测群防体系,要求双桥、太真和杜泽等地开展地质灾害巡查监测,按防灾预案采取防御措施;对新发滑坡,组织应急小组赴现场处置,划定危险区设置警示牌,受威胁群众妥善避让撤离;在滑坡调查评价的基础上,制定削、挡、排等应急处置措施,消除威胁,保障安全。

5 结论与讨论

针对东南沿海山区小流域地质环境特色条件,选择浙中丘陵山区衢江区铜山源小流域为研究区,基于风险评价理论和模糊数学方法,采用耦合权重计算确定方法,构建降雨诱发山区小流域地质灾害动态风险预警模型,建立评价指标体系和分析模式方法,建立降雨激发滑坡、泥石流的统一强度阈值预警指标,以典型代表性降雨事件为实例,依托降雨型地质灾害动态风险预警模型,综合确定研究区小流域地质灾害动态风险水平,以

其为预警判据,进行地质灾害动态风险评价与应急预案研究。

通过研究区典型实例分析以及实际地质灾害发生情况的检验与验证,证实研究区地质灾害动态风险水平分区结果是合理可靠的,通过实施降雨作用下山区小流域突发地质灾害动态风险评价能够有效指导地质灾害应急预案和防灾处置。综合可见,此不失为一种行之有效的技术方法,可进一步开发成动态风险评价与应急预案综合平台系统。

参考文献:

- [1] 王洲平. 浙江省地质灾害现状及防治措施[J]. 灾害学, 2001, 16(4): 63-66.
- [2] 姚辉磊. 浙江省地质灾害发育分布特征及形成条件浅析[J]. 中国水运, 2012, 11(Z1): 81-83.
- [3] 张梁. 地质灾害风险评价理论与方法[J]. 中国地质矿产经济, 1996, 9(4): 40-45.
- [4] 张业成, 张梁. 论地质灾害风险评价[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(3): 1-6.
- [5] Ronald B C, Karl E. Determining the kinematics of slope movement using low cost monitoring and cross section balancing[J]. Environmental & Engineering Geo-science. 2001, 7(2): 193-203.
- [6] Wiecaorek G F, Morgan B A, Campbell R H. Debris flow hazards in the blue ridge of central virginia [J]. Environmental & Engineering Geo-science. 2000, 6(1): 3-23.
- [7] Scott B M, David K K. Evaluation of seismic slope performance models using a regional case study[J]. Environmental & Engineering Geo-science. 2000, 6(1): 25-39.
- [8] Sevta A, Semith M Y. Reliability of lifeline networks with multiple sources under seismic hazard [J]. Natural hazards, 2000, 21(1): 3-9.
- [9] 张春山, 李国俊, 张业成. 黄河上游地区崩塌滑坡泥石流地质灾害风险评价[J]. 地质力学学报, 2006, 12(2): 211-219.
- [10] 沈简, 饶军, 傅旭东. 基于模糊综合评价法的泥石流风险评价[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 171-175.
- [11] 铁永波, 唐川. 汶川县城泥石流灾害灾害风险评价研究[J]. 灾害学, 2010, 25(4): 43-47.
- [12] 国土资源部地质环境司. 地质灾害防治条例释义[M]. 北京: 中国大地出版社, 2004.
- [13] 陈国良. 《国家突发地质灾害应急预案》贯彻实施及地质灾害全面防护实务全书[M]. 北京: 地质科学出版社, 2006.
- [14] 浙江省地质矿产研究所. 浙江省泥石流监测预警衢江示范区建设报告[R]. 杭州: 浙江省地质矿产研究所, 2013.
- [15] 浙江省第七地质大队. 衢州市衢江区农村山区调查评价报告[R]. 衢州: 浙江省第七地质大队, 2015.
- [16] 浙江省国土资源厅. 关于加强乡(镇)地质灾害分布与易发区图编制与评审工作的通知(浙土资发[2004]57号)[Z]. 杭州: 浙江省国土资源厅, 2004.
- [17] 唐小明, 孙乐玲, 游省易, 等. 大比例尺地质灾害易发区图编制的方法与实践[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(1): 117-121.
- [18] 李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [19] 徐兴华, 尚岳全, 唐小明. 滑坡治理稳定状态的耦合权重综合评价方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(6): 1936-1950.

(下转第92页)