

Disaster Risk Assessment of Lahar in Changbai Mountains

Qing Ma¹, Jiquan Zhang^{1,*}, Yichen Zhang², Zhijun Tong¹, Si Alu¹, Lina Han¹,

Xiangqian Li¹

¹School of Environment, Institute of Natural Disaster Research, Northeast Normal University,
Changchun 130024, China

²Jilin Institute of Geological Environmental Monitoring,
Changchun 130021, China

长白山火山泥石流灾害风险评价

马晴¹, 张继权^{1,*}, 张以晨², 佟志军¹, 阿鲁思¹, 韩丽娜¹, 李向前¹

¹东北师范大学环境学院, 东北师范大学自然灾害研究所, 长春 130024, 中国

²吉林省地质环境监测总站, 长春 130021, 中国

Abstract

Lahar is the most important secondary disaster of volcanoes. According to the principle of natural disaster risk, using the natural data and socio-economic statistics of the study area, a risk assessment model for lahar hazards was established using the disaster risk index method, entropy method, and weighted comprehensive evaluation method. The risk zoning map of lahar disaster in Changbai Mountain is obtained, and analyzed the trend of risk over time. The results showed that the risk index of lahar disaster is bigger near the crater, Antu county is the extremely high risk area and Fusong County is the high risk area, the risk index of 5 county-level cities in the study area is positively related to the time.

Keywords: Changbai Mountain volcano; lahar; natural disaster risk; risk assessment.

摘要

火山泥石流是最主要的火山次生灾害。依据自然灾害风险形成原理, 利用研究区的

自然数据、社会经济统计数据, 采用灾害风险指数法、熵值法和加权综合评价法建立了火山泥石流灾害风险评价模型。得到了长白山火山泥石流灾害的风险区划图, 并对风险随着时间的变化趋势进行了分析。结果表明, 离火山口越近的地区火山泥石流灾害风险指数越大, 安图县为极高风险区, 抚松县为高风险区, 研究区内 5 个县级市的风险指数与时间呈正相关关系。

关键词: 长白山火山; 火山泥石流; 自然灾害风险; 风险评价

1. 引言

长白山天池火山是目前我国境内保存最完整的新生代复活火山, 也是我国最著名的具有潜在灾害性喷发危险的火山[1, 2]。长白山天池总蓄水量达 20.4 亿 m³, 一旦天池火山喷发将会形成大规模的火山泥石流[3]。火山泥石流是伴随着火山喷发由火山湖泊的水的突然溢出或火山喷发造成的高温融化的火山顶冰雪所形成的突然增多的水流, 夹杂着火山碎屑物质、岩浆等, 在重力作用下, 沿着火山的沟谷或山坡一起向下快速流动的一种特殊洪流[4]。1963 年意大利维苏

*通讯作者: Zhangjq022@nenu.edu.cn

威火山喷发造成 3000 余人死亡；1985 年哥伦比亚内华达德鲁兹火山喷发造成 2.53 万人死亡，15 万家畜死亡；1991 年菲律宾皮纳图博火山喷发造成 4000 余人死亡[5]。火山泥石流灾害给社会带来的损失不仅仅局限于人员伤亡，也包括财产损失、环境破坏和生态破坏等[6]。

长白山天池火山正处于千年、百年复活期的节点上，具有潜在喷发危险。长白山天池火山是长吉图开发开放先导区的重要组成部分，如果爆发火山泥石流，必将带来严重的危害。目前国内外针对火山泥石流的研究多集中在形成机制、动力学灾害研究、危险性范围预测以及数值模拟等方面，如聂保锋等[7]对长白山天池火山泥石流的分布特征及形成模式进行了研究；徐佩华等[8]对长白山火山次生泥石流灾害的危险性范围进行了预测；Lee 等[9]比较了 2010 年默拉皮火山喷发的 Landsat 影像和 LAHARZ 模拟火山泥石流淹没的危险区。在灾害风险评价方面，国内外多针对火山灾害进行风险评价，对于火山泥石流灾害风险评价的研究较少，如 López-Vázquez 等[10]对墨西哥 Popocatepetl 火山附近居民对火山风险认知，压力和应对反应进行了研究。本文基于自然灾害风险形成原理，利用灾害风险指数法、熵值法和加权综合评价法，结合长白山地区自然、社会经济数据，对长白山地区火山泥石流灾害风险进行评价。火山泥石流灾害风险评价可以为各级政府防治火山泥石流灾害做出正确的决策，提供科学的依据，从而有效的减少火山泥石流灾害。

2. 材料与方法

2.1 研究区概况

长白山位于吉林省东部地区，地理坐标位于 $127^{\circ} 40' E \sim 128^{\circ} 16' E$ ， $41^{\circ} 35' N \sim 42^{\circ} 25' N$ 。长白山天池火山是由碱性岩石组成的巨型复式火山锥或层状火山，主体形成于更新世[11]。长白山天池火山喷发所产生的火山泥石流灾害沿松花江、图们江以及鸭绿江流域广泛分布[5]。沿流域可见众多倒石堆分布，粒度粗，砂砾石混杂在一起，其为火山泥石流的形成提供了大量的固体物质[1]。本研究依据“以古论今”原则，根据大约 1000 年前长白山天池火山喷发的范围以及万园等[12]对火山泥石流灾害展布范围的预测，选取安图县、抚松县、长白山朝鲜族自治县、和龙市、临江市 5 个县级市为研究区（图 1）。

2.2 研究方法

灾害风险指数法。自然灾害风险度的计算公式可以表示为

$$RI = H \times E \times V \times R \quad (1)$$

其中，RI 为自然灾害风险度；H 为自然灾害危险性，指造成自然灾害的变异程度；E 为暴露性（承灾体），指可能受到危险因素威胁的经济、社会、和自然环境系统等；V 为承灾体的脆弱性，指给定危险地区的承灾体由于潜在危险性因素可能造成的损失程度；R 为研究区内部的防灾减灾能力。

熵值法。能够客观的反应指标的权重，指标信息熵越小，表明指标值的变异程度越

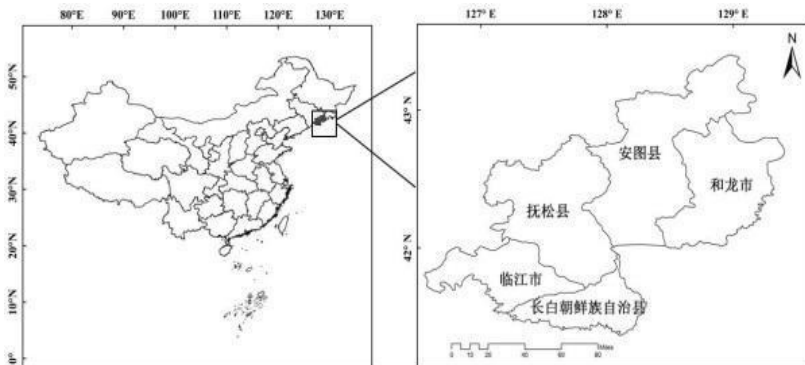


图 1 研究区位置示意图

大，提供的信息量值越多，在综合评价中所起到的作用也越大，其权重也就越大[13]。

加权综合评价法。加权综合评价法是将多个评价指标通过算法进行合成，从而得出综合的评价结果，是假设由于指标*i*量化值的不同，而使每个指标*i*对于特定因子*j*的影响程度存在差别[14,15]，公式可以表示为

$$P=\sum_{i=1}^n A_iW_i \tag{2}$$

其中，*P* 为评价因子的总值；*A_i* 为第*i*个指标经过标准化处理后的值；*W_i* 为第*i*个指标的权重值(*W_i*≥0)；*n* 为评价指标的个数。

2.3 数据获取

本文社会经济数据来源于《吉林省统计年鉴》(2006 年-2016 年)，《延边年鉴》(2006 年-2016 年)，《白山年鉴》(2006 年-2016 年)；危险性数据来源于地理空间数据云

(<http://www.gscloud.cn/>) ,分辨率 90m。

3. 火山泥石流灾害风险评价模型的建立

3.1 火山泥石流灾害风险评价指标体系

根据火山泥石流灾害风险形成原理，结合研究区自然、社会经济状况、文献阅读以及数据收集情况，从危险性(H)、暴露性(E)、脆弱性(V)、防灾减灾能力(R)等四因子角度共选取表中 25 个指标建立火山泥石流灾害风险评价指标体系(表 1)。整个指标体系分为目标层、因子层、子因子层、和指标层，并利用熵值法计算出各指标的权重。

3.2 火山泥石流灾害风险评价模型的建立

根据火山泥石流灾害风险形成原理，利用自然灾害风险指数法、熵值法和加权综合评价法，建立了火山泥石流灾害风险指数模

表 1 火山泥石流灾害风险评价指标体系

目标层	因子层	子因子层	指标层	权重
火山泥石流灾害风险指数	危险性 (H) 0.1915	致灾因子	火山爆发频次 (H1)	0.0229
			年平均降水量 (H2)	0.0308
		孕灾环境	高程 (H3)	0.0428
			坡度 (H4)	0.0323
			坡向 (H5)	0.0239
			曲率 (H6)	0.0388
	暴露性 (E) 0.4268	生命暴露度	居民总人数 (E1)	0.0262
			旅游人口数 (E2)	0.0680
			大牲畜总头数 (E3)	0.0363
		经济暴露度	第一产业总值 (农、林、牧、渔) (E4)	0.0475
			旅游业总产值 (E5)	0.0750
			路网密度 (E6)	0.0354
		生态环境暴露度	耕地面积 (E7)	0.0310
			森林面积 (E8)	0.0384
			自然保护区面积 (E9)	0.0690
	脆弱性 (V) 0.2604	生命脆弱度	0-17 岁和大于 60 岁人口比例 (V1)	0.0431
			女性人口比例 (V2)	0.0265
			在校学生比例 (V3)	0.0226
		经济脆弱度	财政收入占财政支出的百分比 (V4)	0.0506
		生态环境脆弱度	森林覆盖率 (V5)	0.0294
			耕地面积占行政区面积的百分比 (V6)	0.0294
			自然保护区面积占行政区面积的百分比 (V7)	0.0588
	防灾减灾能力 (R) 0.1213	经济投入	地区 GDP 产值 (R1)	0.0447
			财政收入占 GDP 份额 (R2)	0.0383
			固定资产投资密度 (R3)	0.0383

型，具体公式计算如下：

$$LRI = H^{W_H} \times E^{W_E} \times V^{W_V} \times [1 - R]^{W_R} \quad (3)$$

$$H = \sum_{n=1}^{n=6} X_{Hi} W_{Hi} \quad (4)$$

$$E = \sum_{n=1}^{n=9} X_{Ei} W_{Ei} \quad (5)$$

$$V = \sum_{n=1}^{n=7} X_{Vi} W_{Vi} \quad (6)$$

$$R = \sum_{n=1}^{n=3} X_{Ri} W_{Ri} \quad (7)$$

其中，LRI 是火山泥石流灾害风险指数，其值越大表示火山泥石流灾害风险越大；H、E、V、R 的值分别表示火山泥石流灾害危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力因子指数； W_H 、 W_E 、 W_V 、 W_R 、分别表示危险性、暴露性、脆弱性、和防灾减灾能力的权重； X_i 表示各评价指标的量化值； W_i 为各评价指标的权重系数。

4. 火山泥石流灾害风险评价

4.1 长白山火山泥石流风险评价

根据公式（4）~（7）分别计算出研究区内各县级市火山泥石流灾害风险四因子值（图2）。对于危险性从致灾因子和孕灾环境两个角度选取危险性评价指标，根据历史记录估测各县级市所经历的喷发次数，结果表明安图县、抚松县、长白山朝鲜族自治县经历六次，和龙市经历4次，临江市经历2次[16]。再结合降水、地形因素，综合6种危险性因子得出各县级市的危险性值，长白山朝鲜族自治县>抚松县>临江市>安图县>和龙市。其中危险性最高的是长白山朝鲜族自治县，主要原因是其经历的火山喷发次数最多，面积较小，且近火山口；危险性最低的是和龙市，主要原因是其经历的火山喷发次数较少，且高程较低，坡度小，年平均降雨量也较少。对于暴露性和脆弱性值，安图县>抚松县>临江市>和龙市>长白山朝鲜族自治县。安图县的暴露性和脆弱性最高，主要原因是该地区人口、牲畜密度高，旅游业发达，第一产业产值较高，且耕地、森林、自然保护区面积大，因此遭受潜在损失的可能性大。与之相反，长白山朝鲜族自治县的暴露性和脆弱性最低。防灾减灾能力表示受灾区在长期和短期内能够从灾害中恢复的程度，防灾减灾能力越高，可能遭受的潜在

损失就越小，灾害风险越小[17]。安图县的防灾减灾能力最高，主要原因是该地区的GDP产值以及财政收入占地区GDP的份额较高，表明在灾害发生时该区财政支撑能力强。

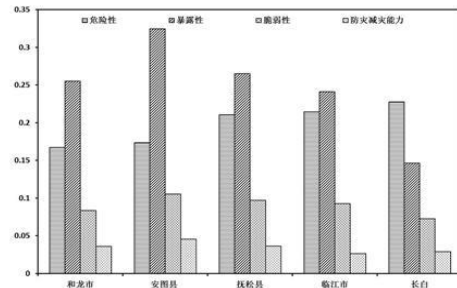


图2 长白山火山泥石流灾害风险四因子

根据公式（3）将火山泥石流灾害四因子进行叠加，计算出长白山火山泥石流灾害风险指数，得到长白山火山泥石流灾害风险区划图（图3）。结果显示安图县为极高风险区，该地区经历了6次火山爆发，离火山口最近，且该区中二道白河直接源于天池，二道白河流域的火山泥石流灾害最为严重。虽然该地区的防灾减灾能力高，但该地区的暴露性和脆弱性也高。长白山朝鲜族自治县为极低风险区，虽然该地区危险性高，但该地区暴露性和脆弱性极低且防灾减灾能力较高，所以该地区的风险值小。

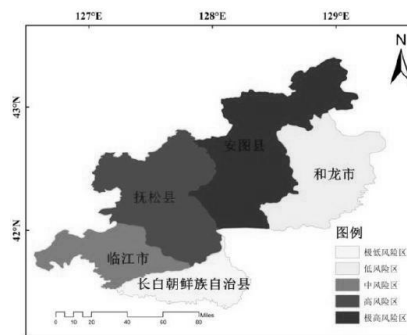


图3 长白山火山泥石流灾害风险区划图

4.2 长白山火山泥石流风险变化趋势

由于自然灾害风险系统是一个变化的系统[18]，所以统计了2005年至2015年

共 11 年的数据, 根据上述方法求出 11 年火山泥石流灾害风险指数的变化情况(图 4)。从图中可以看出五个县级市的 LRI 呈现出逐年上升的变化趋势。将多年变化的 LRI 进行

力角度选取 25 个评价指标, 建立了火山泥石流灾害风险评价指标体系, 构建了火山泥石流灾害风险评价模型, 对长白山天池火山周边县级市进行了灾害风险评价, 得到了该

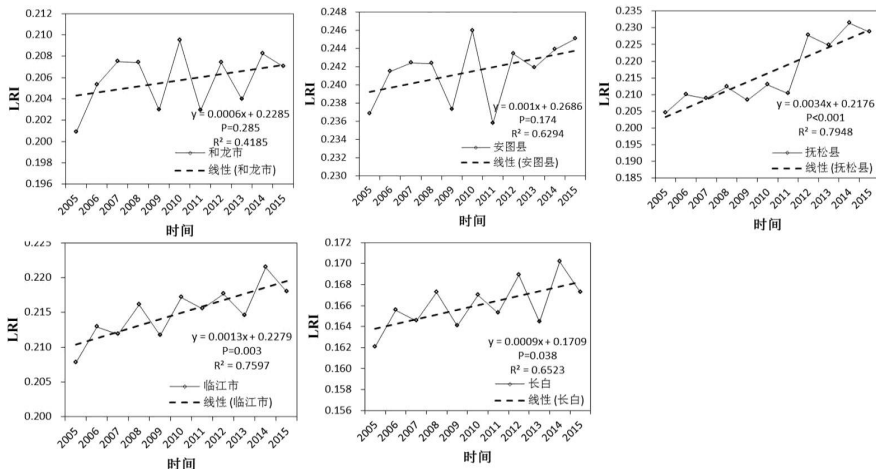


图 4 长白山火山泥石流风险指数变化趋势图

线性拟合, 五个县级市的 LRI 与时间变化均呈正相关关系, 且抚松县、临江市、长白山朝鲜族自治县的变化范围较小, 拟合度较高; 和龙市和安图县的 LRI 波动较大, 拟合度较低。其原因是随着经济的快速发展, 各县级市的暴露性和脆弱性值增加, 所以各县级市的风险值在逐渐增加。根据式 (8) 计算出了 LRI 的年平均变化率(图 5), 其中抚松县的年均变化率最大, 且增长较快, 其余各县级市年平均变化率差异不大。

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \quad (8)$$

5. 结论

本文依据自然灾害风险评价的基本理论, 从危险性、暴露性、脆弱性以及防灾减灾能

区火山泥石流灾害风险区划图。除此之外, 对该区 2005 年至 2015 年共 11 年的火山泥石流风险变化趋势进行研究。结果表明, 安图县为极高风险区, 该地区暴露性、脆弱性和防灾减灾能力值均为最高。抚松县为高风险区, LRI 较高, 年平均变化率为正值且最大, 表明抚松县的风险指数正在快速增长。本文研究的结论与实际相符, 即离火山口越近的县级市风险值越高, 5 个县级市的 LRI 正逐年增长, 有关部门应引起重视, 从政策法规、防灾物资、减灾规划和灾害的预警预报能力这几方面提高各区的防灾减灾能力。

Acknowledgements

This research is supported by the Key Scientific and Technology Program of Jilin Province (20170204035SF) and the Key Scientific and Technology Research and Development Program of Jilin Province (20180201033SF)

致谢

本研究得到了吉林省重点科技攻关项目 (20170204035SF) 和吉林省重点科技研发项目 (20180201033SF) 的资助。

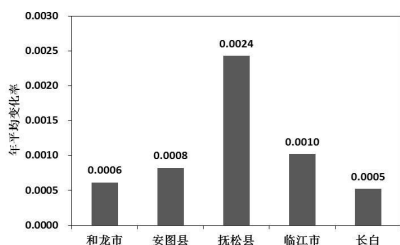


图 5 长白山火山泥石流风险指数年平均变化率

参考文献

- [1] 王禹萌, 邹春红, 吕晗. 基于粗糙集理论的长白山火山泥石流影响因子权重分析. 防灾减灾学报, 2013, 29(2):28-32.
- [2] 温智虹, 万鲁河, 盛俭. 长白山火山泥石流分布影响因子权重分析. 灾害学, 2012, 27(01):64-67.
- [3] 盛俭, 万鲁河, 温智虹, 等. 长白山天池火山泥石流数值模拟. 重庆大学学报, 2013, 36(02):85-90.
- [4] 盛俭, 杜江, 邹春红, 等. 火山泥石流研究回顾. 防灾科技学院学报, 2011, 13(2):43-47.
- [5] 万园. 火山泥石流流动力学及灾害研究. 北京:中国地震局地质研究所, 2012.
- [6] 徐选华, 洪享. 重大地质灾害社会风险定量评估研究. 黄崇福, 包玉海, 赵思健. 中国灾害防御协会风险分析专业委员会第六届年会论文集. 巴黎: 亚特兰蒂斯出版社, 2014: 174-178.
- [7] 聂保锋, 刘永顺, 彭年. 长白山天池火山泥石流分布特征及其形成模式研究. 首都师范大学学报:自然科学版, 2009, 30(01):70-75.
- [8] 徐佩华, 袁中凡, 李广杰, 等. 长白山火山次生泥石流灾害危险范围预测. 吉林大学学报:地球科学版, 2015, 45(04):1155-1163.
- [9] Lee S, Lee C, Lee S. A comparison of the Landsat image and LAHARZ-simulated lahar inundation hazard zone by the 2010 Merapi eruption. Bulletin of Volcanology, 2015, 77(06):46.
- [10] López-Vázquez E, Marván ML. Volcanic Risk Perception, Locus of Control, Stress and Coping Responses of People Living Near the Popocatepetl Volcano in Mexico. Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 2012, 2(1):3-12.
- [11] 张冲冲. 长白山火山灾害对区域生态系统危害及服务价值损失评价. 延吉市: 延边大学, 2013.
- [12] 万园, 许建东, 林旭东, 等. 基于数值模拟的长白山天池火山泥石流灾害展布范围分析及预测. 吉林大学学报:地球科学版, 2011, 41(05):1638-1645.
- [13] 张以晨. 极端降雨诱发地质灾害风险评估、预警级管理对策研究—以吉林省东南部山区为例. 北京:科学出版社, 2017.
- [14] 王永芳, 张继权, 张琪, 等. 科尔沁沙地沙漠化灾害风险评价. 黄崇福, 包玉海, 赵思健. 中国灾害防御协会风险分析专业委员会第六届年会论文集. 巴黎: 亚特兰蒂斯出版社, 2014:480-485.
- [15] Wang W, Qiao S, Zeng F, Guo J, Huang C. An Approach to Ranking Integrated Models for Risk Assessment by Using the Internet of Intelligences. Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 2016, 6(1):2-9.
- [16] 龚文婷. 基于历史上最大规模喷发的长白山火山灾害风险评估与应急管理对策. 长春市: 东北师范大学, 2009.
- [17] 张继权. 综合灾害风险管理导论. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [18] Guo J, Huang C. Time Limit of the Probabilistic Risk for Natural Disaster. Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 2017, 7(3):137-145.