

文章编号: 1008-2786-(2020)2-222-09

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000504

# 横断山区山地灾害的动态风险性评价

徐瑞池<sup>1,2</sup>, 李秀珍<sup>1\*</sup>, 胡凯衡<sup>1</sup>, 聂银瓶<sup>1,2</sup>, 边江豪<sup>3</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100854)

**摘 要:** 对横断山区山地灾害进行科学的动态风险评价, 可为区域防灾减灾工作提供重要的科学依据, 同时对该区域的社会和谐稳定、经济稳步发展具有重要的现实意义。本文以横断山区为研究区, 以五年年际变化为动态变化时间尺度, 构建了山地灾害风险动态评价模型。首先选取发育山地灾害的本底因子作为静态危险性评价因子, 采用频率比法计算了静态危险性, 采用因子叠加法实现了横断山区山地灾害的动态危险性评价; 然后选取人口密度、GDP 密度和土地利用类型作为动态易损性评价指标, 通过简化模型完成了动态易损性评价; 最后根据风险评价模型结合动态危险性和动态易损性评价结果, 得到了横断山区山地灾害不同年份的风险区划图并完成了动态风险评价。主要结果分述如下: (1) 横断山区北部、西北部危险性低, 为低和中危险性集中区; 南部、东南部危险性高, 为高和极高危险性集中区; (2) 位于横断山区南部及东北部的高和极高危险区的地区人口较为密集, 经济活动性较强, 其易损性等级比较高, 相应的风险级别同样较高; (3) 横断山区受强降雨次数、人口密度、GDP 密度和土地利用的动态变化的影响, 各年山地灾害的风险性的空间分布范围具有比较明显的差异, 横断山区的风险性随时间动态变化。

**关键词:** 山地灾害; 横断山区; 动态危险性; 动态易损性; 动态风险性

**中图分类号:** X43

**文献标志码:** A

横断山区地处四川盆地西部、云贵高原西北部和青藏高原东部<sup>[1]</sup>, 区内地形地貌、气象水文、地质构造等地质环境条件复杂, 为崩塌、滑坡、泥石流等山地灾害的发育提供了有利的条件。受自然地质环境的影响, 区域内交通不便, 经济较为落后, 山地灾害的发育加重了地区贫困和环境恶化, 严重制约着该区的社会经济发展。对该区山地灾害进行科学的风险评价工作, 可为防灾减灾工作提供科学依据, 同时对区域社会和谐稳定、经济稳步发展和环境生态

保护具有重要的现实意义。

国内学者针对横断山区山地灾害的空间分布特征和危险性评价已开展了一定程度的研究<sup>[2-5]</sup>, 而少有以整个横断山区为空间尺度, 对山地灾害进行动态风险性评价的研究。对于大区域的灾害风险, 统计模型有利于评估其空间概率, 但由于无法预测控制条件变化的影响, 如土地利用变化、气候变化等, 通常忽略了时间效应<sup>[6]</sup>。然而, 随着自然环境的变化和人类社会的发展, 灾害的风险必然发生变

**收稿日期** (Received date): 2019-05-04; **改回日期** (Accepted date): 2020-04-11

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金面上基金项目 (Y8K1200200); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2015CB452704)。[ National Natural Science Foundation of China (General Program) (Y8K1200200); National Key Basic Research and Development Program of China (973 Program) (2015CB452704) ]

**作者简介** (Biography): 徐瑞池 (1995-), 男, 湖北黄石人, 硕士研究生, 主要研究方向: 地质灾害影响及评价。[ XU Ruichi (1995-), male, born in Huangshi, Hubei province, M. Sc. candidate, research on the evaluation and prediction study of geological hazards ] E-mail: 474220627@qq.com

**\* 通讯作者** (Corresponding author): 李秀珍 (1975-), 女, 内蒙古卓资县人, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 地质灾害评价及预测。[ LI Xiuzhen (1975-), female, Ph. D., associate professor, specialized in the evaluation and prediction study of geological hazards ] E-mail: lxzljt@sina.com

化<sup>[7-8]</sup>。具体来说,由于影响山地灾害危险性的降雨、地震诱发因素和影响易损性的人口、经济、土地利用情况等评价因子在时间和空间上存在动态变化过程,风险性因而也随之发生动态变化。为了更加准确地预测、规避山地灾害,减少灾害损失,有必要对山地灾害的动态风险性进行科学评估。危险性评价是风险性评价的重要组成部分,目前已有研究中的动态危险性评价主要考虑地震和降雨作为主要触发灾害的动态因子,通过建立考虑两者影响的危险性动态评估模型得以实现<sup>[9-10]</sup>。而在动态风险性评估工作中,动态影响因素更加复杂,除了影响危险性的地震和降雨外,还包括了承灾体的综合环境和内在属性变化<sup>[11]</sup>。因此山地灾害的动态风险性研究需要获取以上动态因素的相关数据,以探究各动态因素影响下的风险动态变化特征<sup>[12]</sup>,并通过构建合理的评估模型进行动态风险评价工作<sup>[13-15]</sup>。

在自然因素和社会因素变化环境下对大区域进行山地灾害的动态风险性研究,把握山地灾害的风险动态变化特征,可为山区国土空间规划和灾害防治工作提供重要的理论决策依据。本文以横断山区山地灾害为主要研究对象,考虑影响因子的动态变化,分别计算了山地灾害的动态危险性、动态易损性,应用“ $R = H \times V$ ”模型实现了山地灾害的动态风险评价,探究山地灾害风险性的动态变化特征,以期横断山区山地灾害防灾减灾及国土空间规划和管理提供科学依据。

## 1 研究区自然地质环境概况

### 1.1 自然地质环境概况

横断山区在行政区划上主要由四川省、云南省和西藏自治区部分区县组成<sup>[1]</sup>。区内地貌以山间盆地、湖泊、古冰川侵蚀与堆积地貌为主,在现代冰川作用和重力地貌作用的影响下,崩滑流山地灾害频繁发育<sup>[16]</sup>。横断山区受南北走向的地质构造控制明显,发育了一系列平行山脉和河流,主要为纵向岭谷地貌。该区地势从西北向东南方向由高变低,区内海拔最大高差可达 7157 m,具有山高谷深、相对高差大的特征<sup>[17]</sup>。

研究区受板块运动的影响,新构造运动活跃,广泛发育了如龙门山断裂和金沙江断裂等呈纵向分布

切割剧烈的深大断裂。且受其下切作用影响,区内发育了大量河流水系,主要的大江大河为岷江、大渡河、雅砻江、澜沧江、怒江和金沙江<sup>[17]</sup>。该区下元古界至第四系的地层均有出露,其中第四纪松散堆积物分布最广,在山间盆地、山脚等平缓低洼处均可见如坡积相、洪积相、湖沼相和河湖相等不同成因的沉积物<sup>[18]</sup>。

横断山区气候全年受冬夏季风环流控制,区域差别大,成因复杂,导致降水量在时空上差异明显<sup>[19]</sup>。据横断山区气象站往年降雨数据统计,该区年平均降雨量高达 1137 mm,南部及东北部地区降雨丰富,而北部和西部降雨较少,全年约 90% 的降雨集中于 5—10 月,以大雨、暴雨和夜雨为主。

横断山区 2015 年常住人口为 2004.21 万,国民生产总值总量为 5707.71 亿元<sup>[1]</sup>,人均 GDP 仅为 2.85 万元,远低于全国平均水平。人口的稀少和经济的落后很大程度上受该区域特殊的自然环境影响,山地灾害风险的增加严重制约着经济社会的发展。

### 1.2 山地灾害概况

横断山区山地灾害种类多、分布广泛,崩塌、滑坡和泥石流等灾害均有发育,主要集中分布于横断山区南部和东北部。山地灾害主要受地震、降雨、人类工程活动等因素的影响,据已有数据统计,该区约 80% 的山地灾害由降雨触发<sup>[20]</sup>。山地灾害严重威胁着横断山区人民的生命财产安全和社会经济发展。例如 2009 年 7 月 23 日,四川省甘孜州康定县舍联乡发生特大泥石流灾害,造成 16 人死亡、38 人失踪、4 人受伤,冲毁和掩埋省道 S211 近千米。在 2006—2015 年间,横断山区共发育崩滑流灾害约 932 处,其中约 50% 为泥石流灾害、41% 为滑坡灾害、9% 为崩塌灾害(图 1)。近十多年来,研究区山地灾害呈现出逐年增多的趋势,且造成了重大损失,共造成 1373 人伤亡和将近 25 亿元的直接经济损失<sup>[20]</sup>。

横断山区复杂的地质地貌环境、充沛的降雨为横断山区山地灾害的发育提供了有利的自然环境条件,导致该区山地灾害频繁发生。此外,对于我国西南部相对贫困的横断山区,山地灾害的发生不仅会造成人员伤亡和经济损失,还会在一定程度上造成山区贫困和环境恶化,严重阻碍社会的稳定和发展。

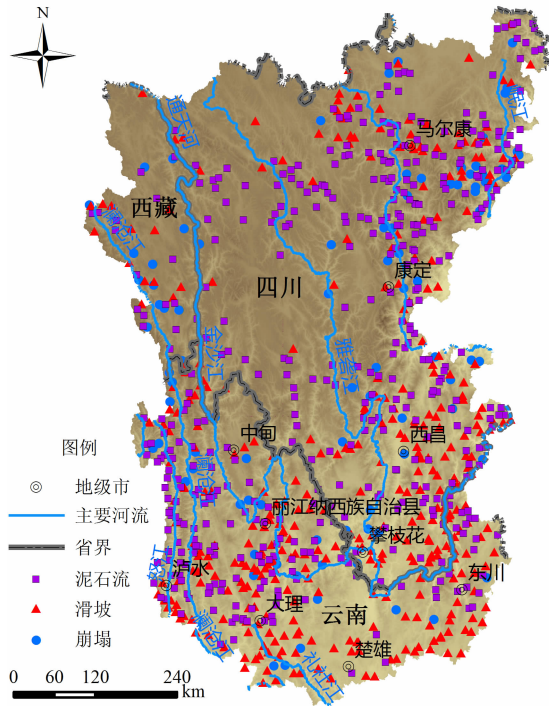


图 1 横断山区山地灾害空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of mountain hazards in the Hengduan Mountain Region

## 2 山地灾害动态风险评价

### 2.1 山地灾害动态风险评价指标体系

一般的风险评估都是针对特定区域特定时间的静态评估,本研究通过山地灾害的本底因子和不同年份动态变化的相关因子综合计算,得到以年为时间尺度的动态风险评价。从山地灾害形成条件出发,并结合野外调查经验,在参考已有研究成果并考虑评价指标可获得性的基础上,综合确定了横断山区山地灾害的动态风险性评估指标,如图 2。通过

灰色关联度分析法<sup>[21]</sup>分别分析气象站点的强降雨次数、年降雨量数据与灾害点密度的关联度,最终确定关联度最大的强降雨次数作为降雨诱发因素。

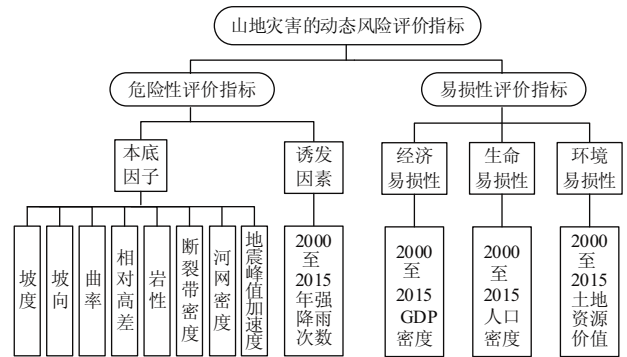


图 2 山地灾害动态风险评价指标体系

Fig. 2 The index system for dynamic risk assessment of mountain hazards

### 2.2 山地灾害动态危险性评价

在动态危险性评价方面,研究团队前期主要考虑了坡度、坡向、曲率、相对高差、岩性、断裂带密度、河网密度等本底因子,应用频率比法<sup>[22-23]</sup>计算横断山区山地灾害静态危险度,并采用因子叠加法,在对静态危险度和动态强降雨次数进行权重赋值的基础上进行加权叠加分析,实现了研究区山地灾害的动态危险性评价<sup>[17]</sup>。基于已有的研究成果,本文考虑地震的影响,本底因子增加地震峰值加速度进行研究区动态危险性评价,危险性区划结果见图 3。

由结果可知,空间上横断山区北部、西北部危险性低,为低和中危险性集中区;南部、东南部危险性高,为高和极高危险性集中区;时间上受降雨分布动态变化的影响,各年灾害危险性差异较为明显。

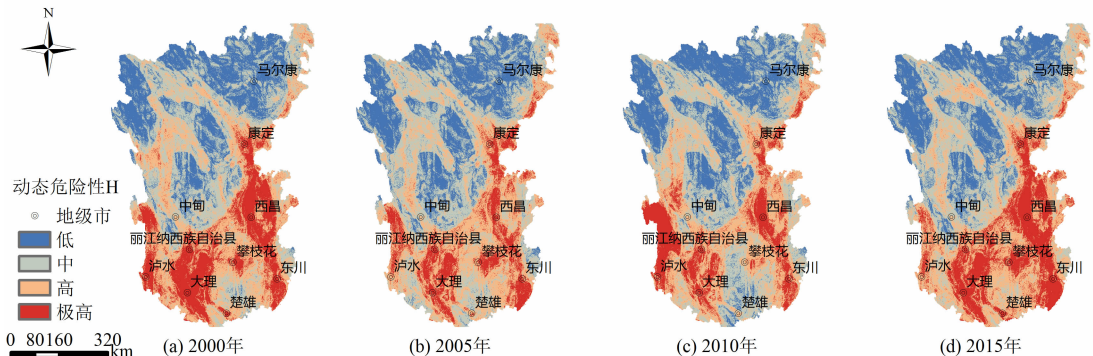


图 3 横断山区 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年山地灾害危险性分区图

Fig. 3 Hazard mapping in the Hengduan Mountain Region in 2000, 2005, 2010 and 2015

### 2.3 山地灾害动态易损性评价

对于区域山地灾害的易损性评价,在评价指标的选取上,一般以人口和经济作为主要分析对象;在评价模型的选取上,目前存在许多基于不同原理的评价模型,如物元综合评价模型、人工神经网络模型、核算承灾体价值模型等<sup>[24]</sup>。由于横断山区覆盖面积广,而针对于大区域尺度研究区,灾害易损性的评价指标在空间上具有变异性,因而在数据获取上存在一定的困难。本文的动态易损性是以年为时间尺度变化的易损性值,为便于大尺度区域评价并考虑到获取资料数据的难度,采用易损度评价的简化模型<sup>[25-26]</sup>(公式1)选取2000、2005、2010和2015年四年的经济易损性评价指标国内生产总值(图4)、生命易损性评价指标人口密度(图5)和环境易损性评价指标土地利用类型(图6)3项动态指标计算横断山区的动态易损性,结果如图7。

$$V = \sqrt{\frac{\frac{G+L}{2} + D}{2}} \quad (1)$$

式中, $V$ 为易损度; $G$ 为单位面积国内生产总值(万元/ $\text{km}^2$ ); $L$ 为单位面积土地利用类型的价值赋值; $D$ 为人口密度(人/ $\text{km}^2$ )。其中, $G$ 、 $L$ 、 $D$ 均为归一化后的取值。

从图7可以得出:横断山区的易损性分区在四个年份中变化较为明显,具有一定的规律性。高和极高易损性主要分布于横断山区南部,并呈逐渐升高的动态变化趋势,这与人口、经济及土地利用价值的增长有关。同时,极高易损性主要集中于横断山区的一些人口集中、经济较好的大中城市如西昌、攀枝花、丽江和大理等,而在川西和藏东南等区域易损性较低。

### 2.4 山地灾害动态风险性评价

联合国地球科学滑坡风险评价工作委员会(IUGS)将风险的定量表达公式表示为<sup>[27]</sup>:

$$R = H \times V \quad (2)$$

式中, $R$ 为风险度, $H$ 为危险度, $V$ 为易损度,无量纲; $H$ 和 $V$ 均为归一化后的取值。利用横断山区山

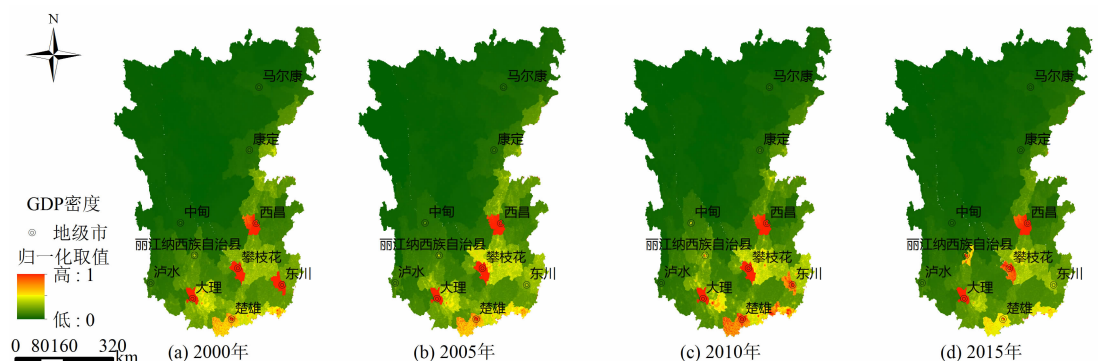


图4 横断山区2000年、2005年、2010年和2015年GDP密度图

Fig. 4 GDP density maps in the Hengduan Mountain Region in 2000, 2005, 2010 and 2015

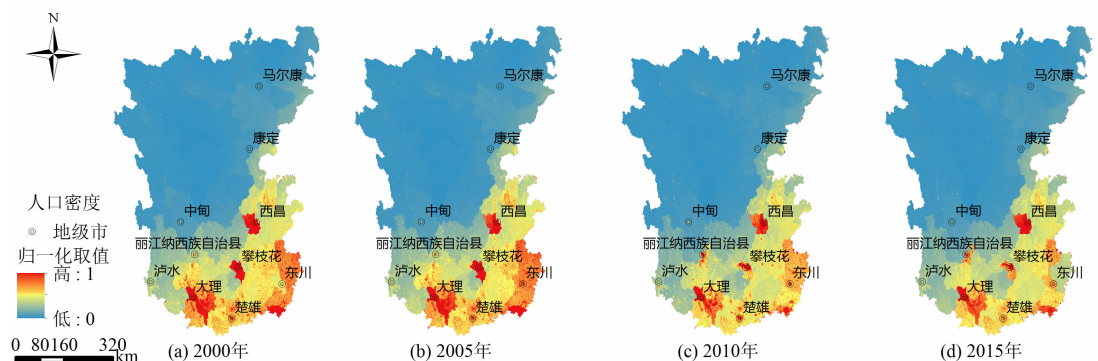


图5 横断山区2000年、2005年、2010年和2015年人口密度图

Fig. 5 Population density maps in the Hengduan Mountain Region in 2000, 2005, 2010 and 2015



地灾害动态危险性和动态易损性数据按以上风险评价模型计算其动态风险性,并将风险性按照自然断点法划分为极高、高、中和低四个等级。横断山区山地灾害的动态风险区划结果见图 8,不同年份不同风险程度的区域统计结果见表 1。

动态风险区划结果显示:从空间尺度整体来看,四年的横断山区风险与危险性的分布特征相似,南部和东北部山地灾害风险水平较高,西北部川藏交界大部分区域风险值较低。高、极高风险主要分布于西昌、攀枝花、丽江、大理、泸水、东川等行政区的大部分区域,该区域不但地质环境复杂脆弱,同时人口稠密,社会经济较发达,因此暴露在山地灾害影响

下的风险值也较高。而对于川西和藏东南等区域,虽然地质环境同样十分复杂,但地广人稀,工商业较为落后,山地灾害风险值主要呈中、低分布。

从时间尺度来看,横断山区高和极高风险区在四个年份出现了明显的变化。与 2000 年相比,2005 年高和极高风险范围在横断山区南部相对减小,在东北部相对增大。与 2005 年相比,2010 年高和极高风险范围在横断山区西南部增大,在其他区域出现了一定程度的减小。2015 年高和极高风险区主要分布于横断山区的东南部,相对于 2010 年,在横断山区西南部出现明显的减小,在西南部出现明显的增大。从分区表中的数据来看,四个年份的低风

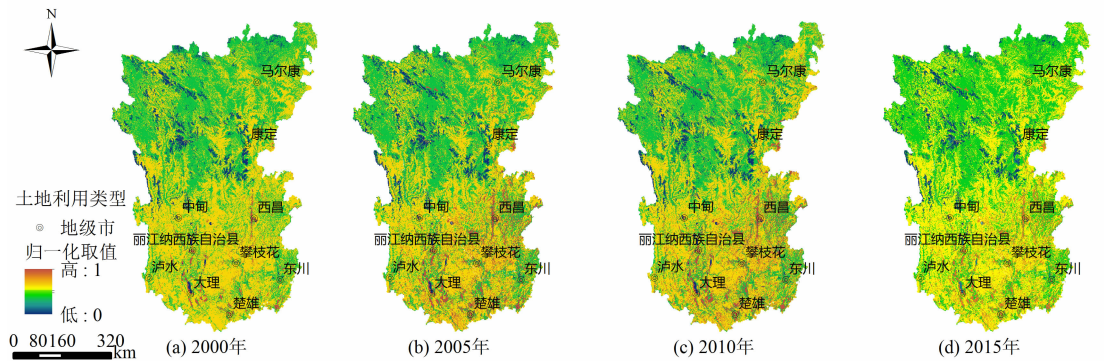


图 6 横断山区 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年土地利用图

Fig.6 Landuse maps in the Hengduan Mountain Region in 2000,2005,2010 and 2015

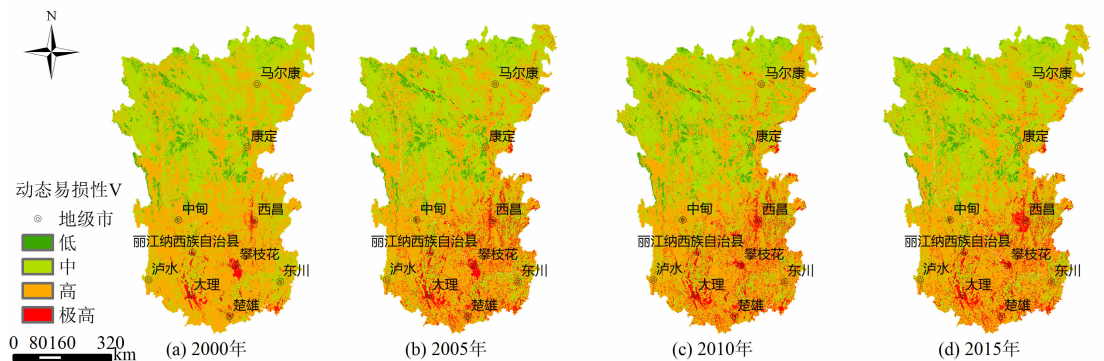


图 7 横断山区 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年山地灾害易损性分区图

Fig.7 Vulnerability mapping in the Hengduan Mountain Region in 2000,2005,2010 and 2015

表 1 横断山区 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年山地灾害风险性分区表

Tab.1 Mountain hazards risk zoning table in the Hengduan Mountain Region in 2000,2005,2010 and 2015

等级	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	面积/(万 km <sup>2</sup> )	比例/%	面积/(万 km <sup>2</sup> )	比例/%	面积/(万 km <sup>2</sup> )	比例/%	面积/(万 km <sup>2</sup> )	比例/%
低	6.39	14.34	6.54	14.69	7.11	15.92	6.97	15.65
中	19.72	44.24	21.16	47.54	20.88	46.75	18.71	42.03
高	13.04	29.26	12.55	28.20	11.94	26.74	12.50	28.08
极高	5.42	12.16	4.26	9.57	4.73	10.59	6.34	14.24

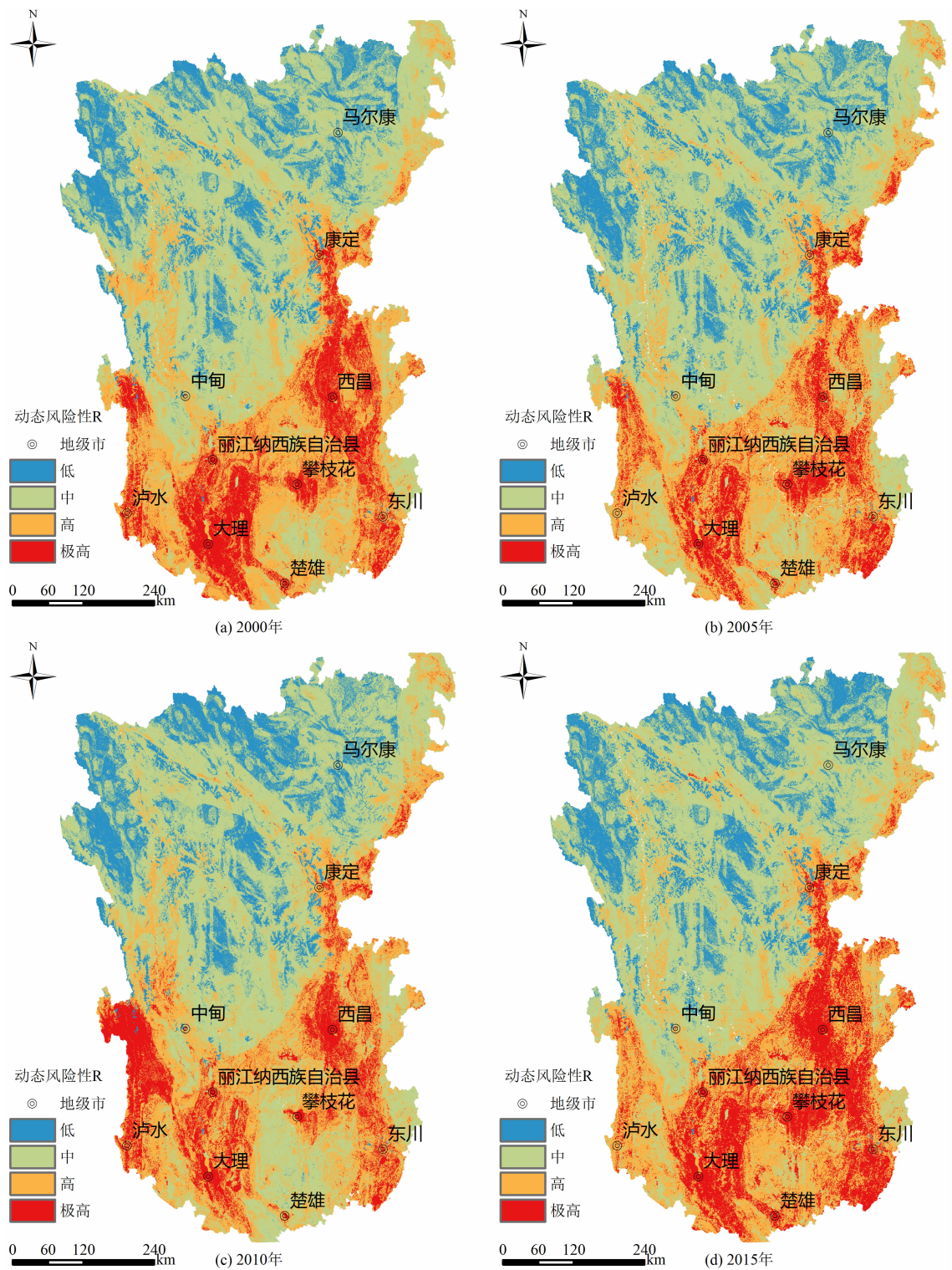


图 8 横断山区 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年山地灾害风险性分区图

Fig. 8 Risk mapping in the Hengduan Mountain Region in 2000, 2005, 2010 and 2015

险区面积变化不大,最大占横断山区的 15% 左右,主要变化发生在中、高和极高风险区面积和比例上。2005 年和 2010 年的中风险区的范围比 2000 年和 2015 年高,在四个年份中出现先增大后减小的趋

势。高和极高风险区的变化趋势相近,其范围在 2000 年后出现了一定程度上的减少,在 2015 年出现上升的趋势。总体而言,横断山区的风险性是随时间动态变化的。



### 3 结论

本文基于 ArcGIS 平台,以横断山区山地灾害为研究对象,重点考虑降雨、人口密度、GDP 密度和土地利用等因子的动态变化,分别计算了横断山区山地灾害 2000—2015 年间每五年的动态危险性和易损性从而实现动态风险评价。主要结论分述如下:

(1)横断山区北部、西北部危险性低,为低和中危险性集中区;南部、东南部危险性高,为高和极高危险性集中区;受降雨分布动态变化的影响,不同时间点灾害危险性差异较为明显。受不同年份人口密度、GDP 密度和土地利用数据变化的影响,高和极高易损性主要分布于横断山区南部的一些人口集中、经济较好的大中城市,且随时间不断变化,呈现出逐渐增高的趋势。

(2)从整体上分析四年的风险结果,位于横断山区南部及东北部的高和极高危险区的地区人口较为密集、经济活动性较强,其易损性等级比较高,相应的风险级别同样较高。而西北部区域地广人稀、工商业较为落后,易损性相对较低,风险值主要呈中、低分布特征。

(3)从时间尺度来看,横断山区受强降雨次数、人口密度、GDP 密度和土地利用动态变化的影响,各年份山地灾害的风险性的空间分布范围具有较明显的差异,横断山区的风险性随时间发生动态变化。

受动态因子的变化,横断山区山地灾害的危险性、易损性和风险性都在不断变化,及时地掌握山地灾害的动态风险变化,并对其进行更加科学有效的防范具有重要的意义。但由于山地灾害动态风险评价的复杂性和数据获取的困难,本研究主要考虑降雨因素的动态变化,未考虑相对复杂的动态因素如地震、植被和人类工程活动等对山地灾害的动态影响,这还需要在今后的研究工作中进一步深入分析和探讨。现阶段由于横断山区研究数据不完善,如动态危险性评价中灾害数据的缺失,降雨数据在处理过程中存在误差,以及动态易损性评价中人口经济等数据的精度准确性等问题,可能会导致动态风险评价结果出现一定偏差。基于此,将持续完善研究区灾害数据并进行动态管理、提高数据处理精度及准确度,为今后的研究提供精确的数据支撑,提高风险性评价的科学性。此外,动态因子的数据获取

是动态风险性评价的关键,由于受监测仪器及数据权限等客观因素影响,及时获取更新的动态因子数据也是山地灾害动态风险评价需要解决的一个重要问题。

**致谢:**感谢国家重点基础研究发展计划(973 计划)“典型山地水土要素时空耦合特征、效应及其调控”项目组戴尔阜研究员、熊东红研究员和刘斌涛博士在基础数据方面提供的帮助和支持。

### 参考文献(References)

- [1] 时振钦,邓伟,张少尧. 近 25 年横断山区国土空间格局与时空变化研究[J]. 地理研究, 2018, **37**(3): 607 - 621. [ SHI Zhenqin, DENG Wei, ZHANG Shaoyao. Research on spatial pattern and spatial change of land in hengduan mountain region in recent 25 years [J]. Geographical Research, 2018, **37**(3): 607 - 621]
- [2] 黄靖,第宝锋,边静虹,等. 凉山州山地灾害空间分布特征及人为驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2014, **21**(6): 278 - 283. [ HUANG Jing, DI Baofeng, BIAN Jinghong, et al. Spatial distribution characteristics and human driving forces of mountain disasters in Liangshan Prefecture [J]. Soil and Water Conservation Research, 2014, **21**(6): 278 - 283]
- [3] 陶媛,胡凯衡,田永中,等. 云南鲁甸地震次生山地灾害分布规律与特征[J]. 地球科学与环境学报, 2015, **37**(4): 84 - 93. [ TAO Yuan, HU Kaiheng, TIAN Yongzhong, et al. Distribution and characteristics of secondary mountain disasters in Ludian earthquake, Yunnan Province [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, **37**(4): 84 - 93]
- [4] 曹楠,申太丽,罗水莲,等. 西昌市地质灾害发育分布规律及防灾建议[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, **21**(1): 127 - 132. [ CAO Nan, SHEN Taili, LUO Shuilian, et al. Development and distribution of geological hazards in xichang city and suggestions for disaster prevention [J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 2010, **21**(1): 127 - 132]
- [5] 李秀珍,刘希林,苏鹏程. 四川凉山州安宁河流域泥石流危险性评价[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, **25**(4): 426 - 430, 457. [ LI Xiuzhen, LIU Xilin, SU Pengcheng. Risk assessment of debris flow in Anning river basin of Liangshan Prefecture, Sichuan Province [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, **25**(4): 426 - 430, 457]
- [6] VAN Westen C J, VAN Asch T W J, SOETERS R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? [J]. Bulletin of Engineering geology and the Environment, 2006, **65**(2): 167 - 184.
- [7] MOSQUERA - Machado S, DILLEY M. A comparison of selected global disaster risk assessment results [J]. Natural hazards, 2009, **48**(3): 439 - 456.

- [8] 刘传正. 崩塌滑坡灾害风险识别方法初步研究[J]. 工程地质学报, 2019, **27**(1): 88–97. [LIU Chuanzheng. Analysis methods on the risk identification of landslide disasters [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, **27**(1): 88–97]
- [9] 胡凯衡, 陈成, 李秀珍, 等. 地震区降雨作用下泥石流易发性动态评估[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, **29**(2): 1–8. [HU Kaiheng, CHEN Cheng, LI Xiuzhen, et al. Dynamic assessment of debris-flow susceptibility under the influence of earthquake and rainfall events [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, **29**(2): 1–8]
- [10] 张永双, 姚鑫, 郭长宝, 等. 龙门山地区震后泥石流灾害区域预警研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, **51**(5): 1014–1023. [ZHANG Yongshuang, YAO Xin, GUO Changbao, et al. Regional Warning of Debris Flow Hazards after Wenchuan Earthquake in Longmenshan Region [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, **51**(5): 1014–1023]
- [11] 黄崇福. 自然灾害动态风险分析基本原理的探讨[J]. 灾害学, 2015, **30**(2): 1–7. [HUANG Chongfu. Discussion on the basic principles of dynamic risk analysis of natural disasters [J]. Journal of Catastrophology, 2015, **30**(2): 1–7]
- [12] FUCHS S, KEILER M, SOKRATOY S, et al. Spatiotemporal dynamics: the need for an innovative approach in mountain hazard risk management [J]. Natural hazards, 2013, **68**(3): 1217–1241.
- [13] 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 Youyi, et al. Dynamic risk assessment and emergency warning of sudden geological hazards in small watersheds in Southeast Coastal Areas [J]. Journal of Catastrophology, 2018, **33**(4): 78–85, 92]
- [14] 冯文凯, 石豫川, 柴贺军, 等. 三峡库区渝巴公路马道子滑坡岸段动态风险评价[J]. 灾害学, 2007(1): 54–59. [FENG Wenkai, SHI Yuchuan, CHAI Hejun, et al. Dynamic risk assessment of the madaozi landslide section of the ganba highway in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Catastrophology, 2007(1): 54–59]
- [15] 范远芳, 黄俊宝, 王国民, 等. 降雨型地质灾害风险动态评价方法探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, **26**(3): 107–113. [FAN Yuanfang, HUANG Junbao, WANG Guomin, et al. Discussion on dynamic evaluation method of rainfall-type geological disaster risk [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, **26**(3): 107–113]
- [16] 毛刚, 胡月萍, 陈媛. 地质灾害频发山区聚落安全性探索——以横断山系的集镇和村庄为例[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, **46**(1): 101–108. [MAO Gang, HU Yueping, CHEN Yuan. Exploration on the safety of mountainous settlements in frequent geological disasters—taking the towns and villages of Hengduan Mountains as an example [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science), 2014, **46**(1): 101–108]
- [17] 徐瑞池, 李秀珍, 胡凯衡, 等. 横断山区山地灾害的动态危险性评价[J]. 灾害学, 2019, **34**(3): 196–201, 208. [XU Ruichi, LI Xiuzhen, HU Kaiheng, et al. A dynamic hazard assessment for mountain hazards in Hengduan mountain area [J]. Journal of Catastrophology, 2019, **34**(3): 196–201, 208]
- [18] 马宏杰. 中国西南横断山地区新生代地层学及古环境变化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013: 16–19. [MA Hongjie. Cenozoic stratigraphy and paleoenvironmental changes in the Hengduan Mountains, Southwest China [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013: 16–19]
- [19] 李宗省, 何元庆, 辛惠娟, 等. 我国横断山区1960–2008年气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2010, **65**(5): 563–579. [LI Zongsheng, HE Yuanqing, XIN Huijuan, et al. Temporal and spatial variation of temperature and precipitation in Hengduan Mountains from 1960 to 2008 [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, **65**(5): 563–579]
- [20] 边江豪, 李秀珍, 胡凯衡. 横断山区山地灾害的区域分布特征与动态演化规律研究[J]. 工程地质学报, 2018, **26**(S1): 6–13. [BIAN Jianghao, LI Xiuzhen, HU Kaiheng. Study on region distribution characteristics and dynamic evolution law of mountain disasters in the Hengduan Mountainous Region [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, **26**(S1): 6–13]
- [21] 李秀珍, 王成华, 邓宏艳. 灰色关联度法和距离判别分析法在溪洛渡库区潜在滑坡判别中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, **21**(4): 77–81. [LI Xiuzhen, WANG Chenghua, DENG Hongyan. Application of grey correlation method and distance discriminant analysis method in identifying potential landslides in Xiluodu Reservoir area [J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 2010, **21**(4): 77–81]
- [22] MONDAL S, MAITI R. Integrating the analytical hierarchy process (AHP) and the frequency ratio (FR) model in landslide susceptibility mapping of Shiv-khola watershed, Darjeeling Himalaya [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2013, **4**(4): 200–212.
- [23] GUO Changbao, MONTGOMERY D R, ZHANG Yongshuang, et al. Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China [J]. Geomorphology, 2015, **248**: 93–110.
- [24] 屈飞行. 川藏联网工程芒康段地质灾害风险动态评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017: 91–92. [QU Feixing. Research on dynamic evaluation of geological hazard risk in mangkang section of Sichuan-Tibet Network Project [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017: 91–92]
- [25] 刘希林, 庙成, 田春山, 等. 十年跨度中国滑坡和泥石流灾害风险评价对比分析[J]. 地球科学进展, 2016, **31**(9): 926–936. [LIU Xilin, MIAO Cheng, TIAN Chunshan, et al. Comparative Analysis of Risk Assessment of Landslides and Debris Flows of China in 2000 and 2010 [J]. Advances in Earth Science, 2016,



- 31(9): 926–936]
- [26] LIU Xilin, MIAO Cheng. Large-scale assessment of landslide hazard, vulnerability and risk in China [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2018, 9(1): 1037–1052.
- [27] 张雪峰. 区域性山地环境的地质灾害风险评价研究[D]. 成都:成都理工大学, 2011: 68–69. [ZHANG Xuefeng. Research on geological disaster risk assessment of regional mountain environment [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 68–69]

## A Dynamic Risk Assessment for Mountain Hazards in the Hengduan Mountain Region, China

XU Ruichi<sup>1,2</sup>, LI Xiuzhen<sup>1\*</sup>, HU Kaiheng<sup>1</sup>, NIE Yinping<sup>1,2</sup>, Bian Jianghao<sup>3</sup>

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;*

*2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

*3. Beijing Academician Control Device Institute, Beijing 100854, China.)*

**Abstract:** Scientific and dynamic risk assessment of mountain hazards in Hengduan Mountain region can provide an important scientific basis for regional disaster prevention and mitigation and has important practical significance for the social harmony and the steady economic development. In this study, a dynamic risk evaluation model of mountain hazards was constructed with the mountain hazards including landslides, collapses and debris flows taking as research object and the interannual change taking as the time scale of dynamic analysis. Firstly, the background factors affecting mountain hazards were selected as the evaluation factors, and the static hazard degree of the mountain hazards in the region was calculated by using frequency ratio method. on this basis, the dynamic impact of rainfall as main inducing factor was considered, and dynamic hazard assessment was completed by factor superposition method. Then, population density, GDP density and land use types were selected as vulnerability assessment factors, and dynamic vulnerability assessment was completed through a simple statistical model. Finally, dynamic risk assessment of the mountain hazards of Hengduan Mountain region was realized, combined with the results of dynamic hazard and vulnerability assessment results. The results showed that: (1) The high and extremely high-risk areas were mainly distributed in the southern and northeastern parts of the Hengduan Mountain region, where the number of heavy rainfalls was high, and the hazard of the region showed an overall trend of low northwest and high southeast. (2) In the high and extremely high-risk areas of the southern and northeastern parts, the population was relatively dense, and the economic activity was strong, so the vulnerability level of the mountain hazards was relatively high, and the corresponding risk level was also high. (3) The spatial distribution of mountain hazard risk in the region had obvious differences in different year and the risk of the region changes dynamically with time, due to the influence of the dynamic factors such as rainfall, population density, GDP density and land use.

**Key words:** mountain hazards; Hengduan Mountain Region; dynamic hazard assessment; dynamic vulnerability assessment; dynamic risk assessment