

文章编号: 1008-2786-(2020)5-679-12
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000545

延安市宝塔区地质灾害风险评价

杨 柳, 牟鑫亮, 李 晨, 郑 续, 岳东霞*

(兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

摘 要: 延安市宝塔区地处黄土高原地区, 滑坡、崩塌等地质灾害频发, 严重威胁当地居民生命和财产。本文在地质灾害历史统计资料基础上, 基于现代遥感和 GIS 技术, 并结合 SBAS-InSAR 监测数据, 将不稳定斜坡危害区域面积占比引入危险性评价指标体系, 不稳定斜坡危害区域内居民点数纳入易损性评价指标体系, 构建了较为完善的、适用于宝塔区的地质灾害风险评价指标体系, 以 30 m 栅格为单元对宝塔区进行了高分辨率的地质灾害风险评价。结果显示: 宝塔区可划分为极高风险区、高风险区、中等风险区、低风险区、极低风险区, 分别占全区面积的 1.02%、9.24%、21.60%、32.62%、35.50%; 极高风险区和高风险区主要分布于宝塔区中部延河流域地区及北部地区; 极低风险区主要分布于宝塔区北部及南部汾川河流域地区。本次评价结果有效提高了该研究区地质灾害风险评价的精度, 可为宝塔区地质灾害风险预防和国土空间规划提供依据。

关键词: 地质灾害; 宝塔区; 危险性; 易损性

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

地质灾害严重威胁当地人民的生命安全和生活^[1]。目前国内外有关地质灾害的评价内容及相应的评价方法较多, 除传统的地质灾害成因机理分析以外, 还包括地质灾害的危险性评价、易损性评价、破坏损失评价、防治工程效益评价、风险评价等^[2]。其中, 地质灾害风险评价能够定量分析和评价区域地质灾害发生的可能性及灾害损失, 可为地质灾害监测、预警、防治以及国土空间规划提供重要的科学依据^[3-4]。当前以 GIS 空间分析技术为支撑, 在危险性评价和易损性评价的基础上, 构建指标体系和评价模型, 开展区域地质灾害风险评价研究已成为国内外学者普遍采用的方法^[5-11]。然而, 已有研究大多基于历史灾害的基础调查数据开展地质灾害风险评价, 很少将潜在风险指标纳入区域地质

灾害风险评价的框架体系之中, 且由于数据精度的限制, 导致风险评价结果较粗, 因而不能很好地指导地质灾害防灾减灾工作的准确实施。因此, 如何有效提高区域地质灾害风险评价的精度和准确度成为国内外亟待解决的重要问题。大量研究表明, 基于高分辨率的微波遥感数据和合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 技术的不稳定斜坡地表形变监测结果可以有效反映滑坡、崩塌等地质灾害发生的可能性和准确位置, 是区域地质灾害隐患点早期识别的新技术^[12-13]。因此, 将基于该技术的地质灾害早期识别成果运用于区域滑坡崩塌灾害风险评价, 则能够实现有效提高地质灾害风险评价精度和准确性的目标。

陕西省延安市宝塔区地质灾害调查结果^[14]表

收稿日期 (Received date): 2020-06-15; **改回日期** (Accepted date): 2020-08-03

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划项目 (2017YFC1501005); 中国地质调查局项目 (DD20189270 [2019]086); 中央高校基本科研业务费项目 (lzujbky-2020-sp03)。[National Key Research and Development Program of China (2017YFC1501005); China Geological Survey Project (DD20189270-[2019]086); The Fundamental Research Funds for the Central University (lzujbky-2020-sp03)]

作者简介 (Biography): 杨柳 (1994-), 男, 河南三门峡人, 硕士, 主要研究方向: 地质灾害风险评价。[YANG Liu (1994-), male, born in Sanmenxia, Henan province, M. Sc. research on geological hazard risk assessment] E-mail: yangliu2018@lzu.edu.cn

* **通讯作者** (Corresponding author): 岳东霞 (1969-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 地质灾害风险评价。[YUE Dongxia (1969-), female, Ph. D., professor, research on geological hazard risk assessment] E-mail: dxyue@lzu.edu.cn

明,该区地形破碎,黄土堆积厚度大,生态地质环境脆弱,滑坡、崩塌等地质灾害高发频发,危害十分严重,且存在大量的潜在隐患点,对该区人民生命财产安全和经济建设造成极大威胁,急需开展全面的地质灾害风险评价。因此,本文选取延安市宝塔区为研究区,基于历史地质灾害的统计资料和观测数据,充分考虑不稳定斜坡存在的潜在威胁,利用时序微波遥感数据和小基线集成孔径雷达干涉测量 (Small Baseline Subsets InSAR, SBAS-InSAR) 技术开展了研究区不稳定斜坡地表形变的早期识别,将其作为地质灾害风险评价的关键指标,构建了适合宝塔区的地质灾害风险评价的指标体系。基于此,利用现代遥感技术、GIS 技术和广义目标函数法等技术方法,以 30 m 栅格为单元开展了宝塔区高分辨率的地质灾害风险评价,以期为宝塔区的防灾减灾、国土空间规划和政府宏观决策提供一定的科学依据。

1 研究区概况

宝塔区位于陕西北部黄土高原的中部,属于典

型的继承型和继承、侵蚀混合型的黄土梁峁沟壑区 (图 1)。地理坐标介于北纬 $36^{\circ}11' \sim 37^{\circ}02'$ 、东经 $109^{\circ}14' \sim 110^{\circ}07'$ 之间,海拔 857 ~ 1541 m,南北长约 96 km,东西宽约 76 km,面积 3546 km²。境内以延河和汾川河为主要河流,两条河流均属于黄河的一级支流。

宝塔区内主要包括三叠系、侏罗系、新近系和第四系等中-新生代地层,其中第四纪黄土几乎遍布全区,其余时代地层主要沿河谷两侧零星分布^[14]。境内黄土堆积厚度大,土质疏松,节理发育,广阔覆盖于起伏不平的基岩之上。由于延河、汾川河及其支流的长期侵蚀及切割作用,形成了梁峁起伏、河谷深切的地形,加之该区属于半湿润半干旱大陆性季风气候,年平均降水量 562.1 mm,且集中分布在 6 月—9 月^[15]。特殊的地形地貌、岩土和气候等自然条件,以及近年来人类对自然资源的不合理利用导致宝塔区滑坡、崩塌灾害高发和频发,危害严重。不仅如此,该区还广泛分布有大量不为人知的不稳定斜坡,潜在的地质灾害也严重威胁着当地的生态环境安全和经济可持续发展。

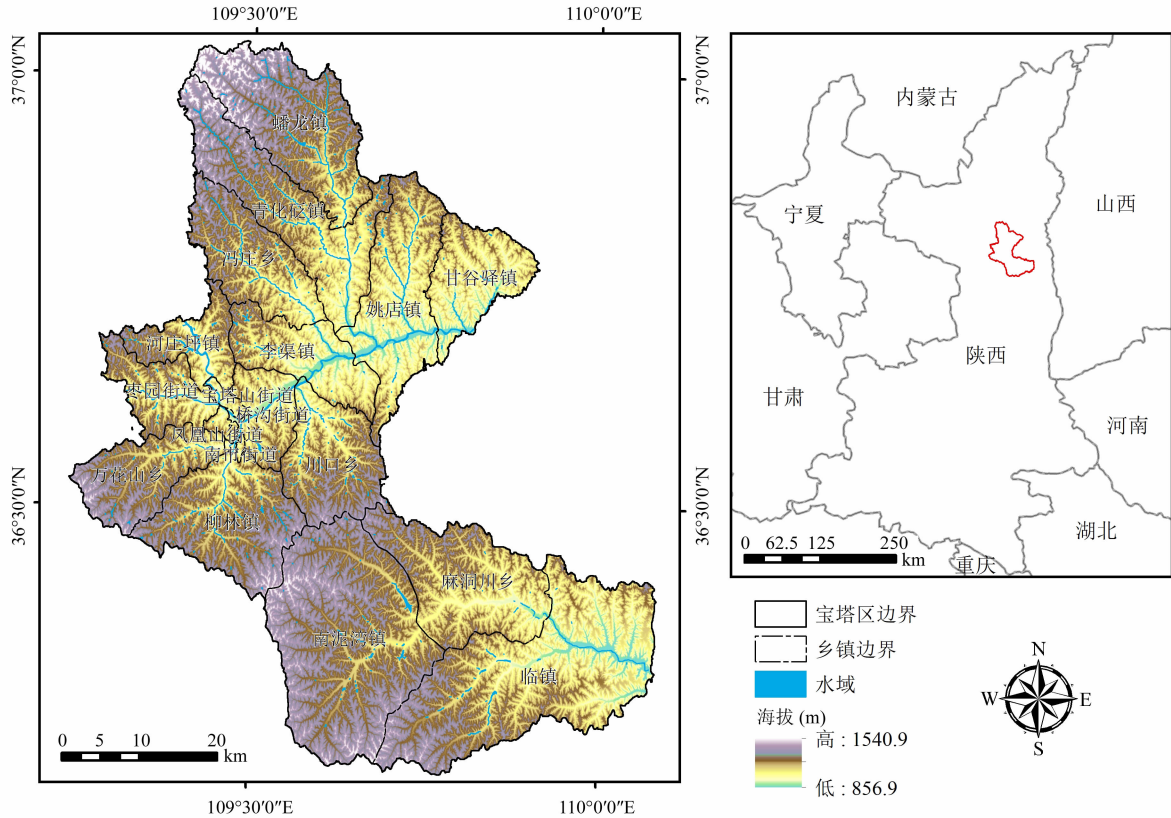


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Location of the study area

2 地质灾害风险评价指标体系构建

地质灾害的发生是致灾体在自然因素和社会因素的综合影响下作用于承灾体上产生的影响和破坏,具有危害性、可变性、不确定性以及复杂性等特征^[4]。地质灾害风险评价即某一特定区域和某特定时间段内,对某种地质灾害造成的人们生命财产和社会经济的可能损失进行评价^[17]。目前,国内外学者普遍认为地质灾害风险评价由地质灾害危险性评价和易损性评价共同组成,并从危险性和易损性两个方面构建指标体系,同时提出了表征风险程度的定量计算式:风险度 = 危险性 × 易损性^[4, 11]。

地质灾害的发生,通常是多因子综合作用的结果,评价因子的选取将会直接影响评价结果的准确程度,因此应尽量选取能反映研究区地质灾害发育特征的影响因子。国内学者对地质灾害危险性评价和易损性评价中采用的常用评价指标进行统计^[16-17];并在宝塔区地质灾害调查的基础上,分析了黄土滑坡和崩塌的控制因素和诱发因素^[18-19]。本研究在以上研究的基础上结合宝塔区特征,从地质灾害危险性和易损性两个方面,基于目标层—准则层—基础层 3 个层次,构建宝塔区的地质灾害危险性和易损性评价指标体系。进而基于地质灾害风险评价模型定量评价研究区的灾害风险程度,并将其划分为极低风险区、低风险区、中等风险区、高风险区、极高风险区等 5 个级别的地质灾害风险区,从而确定每个风险区的空间位置。

2.1 地质灾害危险性评价指标体系

根据黄土高原地区地质灾害的形成机理和诱发条件,以及宝塔区特殊的地质环境,确定宝塔区危险性评价的准则层分别为地形地貌条件、地质条件、降雨和植被条件、灾害指数条件及人类活动。根据 5 个准则层,选取高程等 12 个基础指标共同构成宝塔区地质灾害危险性评价指标体系(表 1)。各指标选取的具体依据如下:

基本地貌形态是由地貌最基本内外营力的过程形成的,主要划分为地貌面的海拔高度、地面坡度和起伏度这三个基本指标^[20]。因此,本次研究的地形地貌条件选取高程、坡度、地表起伏度 3 个基础指标。在宝塔区,高程通过影响地下水位的深度和人类活动范围间接对地质灾害产生作用。高程越高的

地区,斜坡体内潜水含量和人类工程活动相对较少,一定程度上降低了灾害发生的可能性^[17]。坡度和地形起伏度为松散物质势能向动能转化的主要因素^[21],控制着斜坡上松散物质堆积厚度以及斜坡体的稳定程度。地质灾害受坡度和地形起伏度的影响比较大,坡度和地形起伏度越大的地区,越容易发生地质灾害,危险性越高。

地层岩性是滑坡、崩塌灾害发生、发展的物质基础;而河流水系是一个地区地表径流大小的体现,在一定程度可以反映该地区的沟谷密度,河流冲刷也是滑坡、崩塌发生的重要因素。因此,地质条件选取地层岩性和距水域距离 2 个基础指标。其中,地层岩性的类型及软硬程度对地质灾害的发生有一定的影响,岩性越坚硬,危险性越低。河流通过侵蚀作用对斜坡体的稳定性产生影响,距离河流越远,地质灾害发生的可能性就越小。

降雨和植被条件包括降雨量和植被覆盖度 2 个基础指标。其中,降雨是滑坡、崩塌发生的主要激发和诱发因素,降雨量越大的地区,越容易发生地质灾害,危险性越大。植被覆盖度是反映该区域生态环境的重要指标,植被覆盖度越高,保持水土的能力越高,生态系统抵抗扰动的能力就越强,危险性越小。

研究区主要地质灾害类型为滑坡、崩塌,而不稳定斜坡极有可能发展为滑坡或崩塌。因此,灾害指

表 1 宝塔区地质灾害危险性评价指标体系
Tab. 1 The index system for geo-hazard fatallness assessment in Baota District

目标层	准则层	基础层	权重
危险性评价	地形地貌条件	高程	0.040
		坡度	0.080
		地表起伏度	0.080
	地质条件	地层岩性	0.100
		距水域距离	0.150
	降雨和植被条件	降雨量	0.140
		植被覆盖度	0.060
	灾害指数	灾害点密度(崩塌、滑坡)	0.125
		不稳定斜坡危害区域面积占比	0.125
	人类活动	人口密度	0.030
		人均 GDP	0.010
		距路网距离	0.060

数包含灾害点密度和不稳定斜坡危害区域面积占比 2 个基础指标。其中,灾害点密度指单位面积崩塌点和滑坡点数量,其值越大,危险性越大。不稳定斜坡是指受到岩性、坡度、降雨、植被等多种因素作用后发生变形失稳的斜坡^[22],是潜在的崩塌和滑坡隐患点。宝塔区内不稳定斜坡危害区域范围占总区域面积的比例,这个指标是衡量该区域受到不稳定斜坡危害程度的大小,其值越大,危险性越大。

人类活动除了考虑人类工程活动外,还需要考虑人类经济状况,而人均国内生产总值(GDP)可以反映人类经济状况。因此,本研究中人类活动考虑人口密度、人均 GDP 和距路网距离 3 个基础指标。其中,人口密度大,受地质灾害的威胁也越大,相应的危险性就越大。人均 GDP 主要是反映区域在应对灾害时的经济实力状况;人均 GDP 越高,应对灾害时经济实力越强,防治滑坡、崩塌灾害的能力就越大,则地质灾害的危险性越小。削坡修路是研究区内人类主要的工程活动之一,其对山体造成一定破坏,改变了地质环境,诱发大量地质灾害^[23]。本次研究中主要考虑距路网距离这一诱发因素对地质灾害的影响,距路网距离越近则危险性较大。

2.2 地质灾害易损性指标体系

在调查宝塔区地质灾害的分布规律及承灾体基本特征的基础上,本文将易损性评价分为人口易损性、社会经济易损性、物质易损性及灾害指数 4 个准则层,并确定 8 个基础指标(表 2)。各指标选取的具体依据如下:

人口易损性主要是指滑坡、崩塌等地质灾害发生时可能造成的人员伤亡大小,强调的是人类应对滑坡、崩塌灾害时的防御能力。本研究选取文盲比例、人口密度作为评价的基础指标。文盲比例能够反映受教育程度及对地质灾害的防范能力。文盲比例越高,则受教育程度相对越低,对地质灾害的防范能力越弱,易损性越高。人口密度由乡镇人口数除以乡镇面积得到,人口密度大的区域生存环境的压力就越大,相应的易损性就越大。

社会经济易损性主要是指滑坡、崩塌等地质灾害发生时造成经济财富损失的程度。本研究选取人均 GDP 和农民人均粮食产量作为评价的基础指标。人均 GDP 是衡量经济发展状况的指标,主要反映该区域在应对地质灾害时的经济实力状况;人均 GDP

越高,应对灾害时经济实力越强,易损性越小。农民人均粮食产量越多,说明当地自给自足能力越强,地质灾害发生时影响相对较小,易损性越低。

物质易损性是指滑坡、崩塌等地质灾害发生时可能造成的有形资产损失的大小,本研究选取耕地面积占比和建筑用地面积占比作为评价的基础指标。耕地面积占比为宝塔区内耕地面积与宝塔区总面积的比值,占比越大,易损性越高。同样,地质灾害易损性和建筑用地面积占比指标成正相关关系,即地质灾害易损性会随着建筑物用地面积占比的增大而增大。

灾害指数是易损性评价的关键指标,根据研究区地质灾害特征,本文选取灾害点密度和不稳定斜坡区域内居民点数作为评价的基础指标。灾害点密度指单位面积崩塌点和滑坡点数量,是衡量区域灾害暴露度的重要因素,其值越大,灾害暴露度越大,易损性随之越大。不稳定斜坡区域内居民点数越多,则该区域受到地质灾害的影响越大,该区域易损性越大。

表 2 宝塔区地质灾害易损性评价指标体系

Tab. 2 The index system for geo-hazard vulnerability assessment in Baota District

目标层	准则层	基础层	权重
易 损 性 评 价	人口易损性	文盲比例	0.105
		人口密度	0.195
	社会经济易损性	农民人均粮食产量	0.120
		人均 GDP	0.180
	物质易损性	耕地面积占比	0.080
		建筑用地面积占比	0.120
	灾害指数	灾害点密度(崩塌、滑坡)	0.100
		不稳定斜坡危害区域内居民点数	0.100

3 地质灾害风险评价方法

3.1 地质灾害风险评价数学模型建立

国内外学者针对不同的风险评价对象和评价内容,提出了各种风险计算模型和方法^[4]。广义目标函数法^[24-25]是目前广泛应用的综合评价方法,该方法将各评价指标的值乘以该指标所处评价等级中所占的权重,然后进行求和。该方法既可以全面考虑

宝塔区地质灾害风险评价的影响因素,又能反映评价中各种影响因素关系及其重要性。因此,本文在综合考虑地质灾害风险评价的核心内容和研究区地质环境背景的基础上,选择该方法构建宝塔区地质灾害危险性、易损性和风险评价模型。

(1) 地质灾害危险性评价模型

$$WX_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{n_i} w_{ij} w_{ijk} \quad (1)$$

式中: WX_i 为危险性指数; n 为一级评价指标的个数, $i=1,2,\dots,n$; n_i 是第 i 个一级指标下的二级指标个数, $j=1,2,\dots,n_i$; w_{ij} 为第 i 个一级指标中第 j 个二级指标的权重; w_{ijk} 是二级指标的实际贡献值,也就是标准化处理后的数据。

(2) 地质灾害易损性评价模型

$$YS_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{n_i} y_{ij} y_{ijk} \quad (2)$$

式中: YS_i 为易损性指数; n 为一级评价指标的个数, $i=1,2,\dots,n$; n_i 是第 i 个一级指标下的二级指标个数, $j=1,2,\dots,n_i$; y_{ij} 为第 i 个一级指标中第 j 个二级指标的权重; y_{ijk} 是二级指标的实际贡献值,也就是标准化处理后的数据。

(3) 地质灾害风险评价模型

根据联合国人道主义事业部^[1] (UNDHA) 公布的自然灾害风险定义,地质灾害风险评价模型可表达如下:

$$FX_i = WX_i \times YS_i \quad (3)$$

式中: FX_i 为评价单元的风险指数。

3.2 地质灾害风险评价权重确定

地质灾害风险评价涉及的因素很多,各个因素的贡献大小不同,需要对各因素赋予权重来反映不同因素的重要程度。由于地质灾害发生的复杂性和不确定性,过分地依靠数学模型得出的权重不尽合理,使用专家打分法^[1]对地质灾害因素进行赋权是较为可靠的,专家打分法是目前应用较多的赋权方法。因此本文选取该方法,在征求20位本领域专家的基础上,确定了各评价指标的权重(表1、表2)。

3.3 数据来源及处理

根据以上评价指标体系,本研究通过多种方法获取各指标原数据,包括:延安市宝塔区的地形、土地利用、植被覆盖度、社会经济以及地质灾害等数据,并按评价需求进行了数据整理和计算。其中,地形数据包括宝塔区高程、坡度、起伏度及地层岩性,

来源于中国地质调查局西安地调中心;土地利用数据以宝塔区2018年 Landsat TM/ETM+/OLI 影像(空间分辨率30 m)为基础,结合野外GPS验证,由人工目视解译获得;植被覆盖度数据集(空间分辨率250 m)是基于2018年MODIS NDVI产品利用像元二分法进行计算得到的;2018年国内生产总值(GDP)数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心;社会经济数据来源于2018年宝塔区统计年鉴;距水域距离指每个栅格点到河流的最近距离,是在所提取的水系的矢量图层上,利用ArcGIS软件中的点到直线的距离工具计算得到;距路网距离是每个栅格点到道路最近距离,是在所提取的道路的矢量图层上,使用ArcGIS软件的点到直线的距离工具计算得到;建筑用地面积占比通过计算区内建筑物平面面积总和与整个宝塔区区域面积的比值而求得。以上数据最后在GIS平台上将空间分辨率重采样为30 m × 30 m。

地质灾害数据主要包括滑坡、崩塌和不稳定斜坡数据,历史灾害数据由中国地质调查局西安地调中心提供;不稳定斜坡地表变形数据系利用小基线集技术(SBAS-InSAR)和ArcGIS平台处理得到。具体如下:

SBAS-InSAR具有灵活性强,监测成本低,观测周期短,不受地形限制等优点,可以在较短的时间内获取全天时、全天候的研究区地表变形数据,从而达到对潜在滑坡和崩塌进行早期识别。该技术针对传统的干涉测量方法的缺点和限制进行了改进,克服了传统干涉测量方法中存在的时间、空间基线去相干以及大气效应的限制,使形变结果在时间和空间上变得更为连续^[22]。SBAS-InSAR主要包含查分干涉图的形成、高相干目标控制点的选取、相干点沉降速率和形变场的获取等5个关键处理步骤^[26]。本次实验处理采用的是2017年9月—2019年4月的47景Sentinel 1A数据,基于Bperp空间基线小于45 m、Btemp时间基线小于90天形成44对干涉相对,对数据进行影像配准、干涉、相位解缠、去平地相位、高相干点筛选、变形反演、噪声滤除、误差校正等一系列处理,计算获取了宝塔区LOS向地表形变速率。通过对宝塔区地表形变数据的分析,利用变形特征识别不稳定斜坡的位置、范围,并进行现场考察验证,进而识别出潜在的滑坡、崩塌隐患点及其危害范围。通过野外考察验证、统计分析和专家经验判

断,对全区不稳定斜坡进行了早期识别,结合历史调查数据得到宝塔区地质灾害分布图(图2)。

本次宝塔区地质灾害风险评价选取的大部分评价指标的原数据多是基于 DEM 数据和遥感数据进行处理获得的。由于研究区地形破碎,沟壑纵横,土质疏松,对评价精度要求高,因此出于对评价精度和方便计算两方面考虑,并经过反复提取、试验,最终选用 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的网格单元作为评价单元开展评价研究工作。对于不满足该条件的数据,通过 GIS 技术将其空间分辨率重采样为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,以实现在统一的栅格单元上开展评价与分析。

在实际评价过程中,需要对主要评价指标进行赋值;主要因素中能直接用数据表示的直接用数据表示;不能直接用数据表示的一些描述性因素,则通过数据概化进行赋值后转化为数值数据^[27]。因所涉及的各项评价指标的量纲不一致,不能够直接进行比较与分析,为了提高评价结果的准确性与科学性,需要对数据进行归一化处理,消除量纲的影响,用于开展综合评价。本研究中采用极差标准化^[28],对相应的指标进行处理。

4 结果与讨论

4.1 地质灾害危险性评价

基于危险性指标和评价模型,计算得到宝塔区地质灾害危险性指数,并利用 GIS 中自然间断点分级法将宝塔区地质灾害危险性评价结果分为 5 级:极低危险区、低危险区、中等危险区、高危险区、极高危险区。如图 3 所示,宝塔区地质灾害危险性的空间特征明显,其中,中心城区的地质灾害危险性较高,南部和北部区域的地质灾害危险性较低,海拔较低的沟谷地带是研究区地质灾害高危险聚集区,特别是在延河和汾川河的汇流区域。

其中,宝塔区极高危险区面积为 151.46 km^2 ,占研究区总面积的 4.55% ,主要分布在宝塔区中心城区的桥沟街道的北部和西南部、宝塔山街道的西部以及柳林镇北部和中部。高危险区面积较大,占研究区总面积的 21.78% ,主要分布在宝塔区北部的甘谷驿镇、姚店镇、蟠龙镇东南部、青化砭镇东部,宝塔区南部的麻洞川乡东部、临镇以及中心城区的

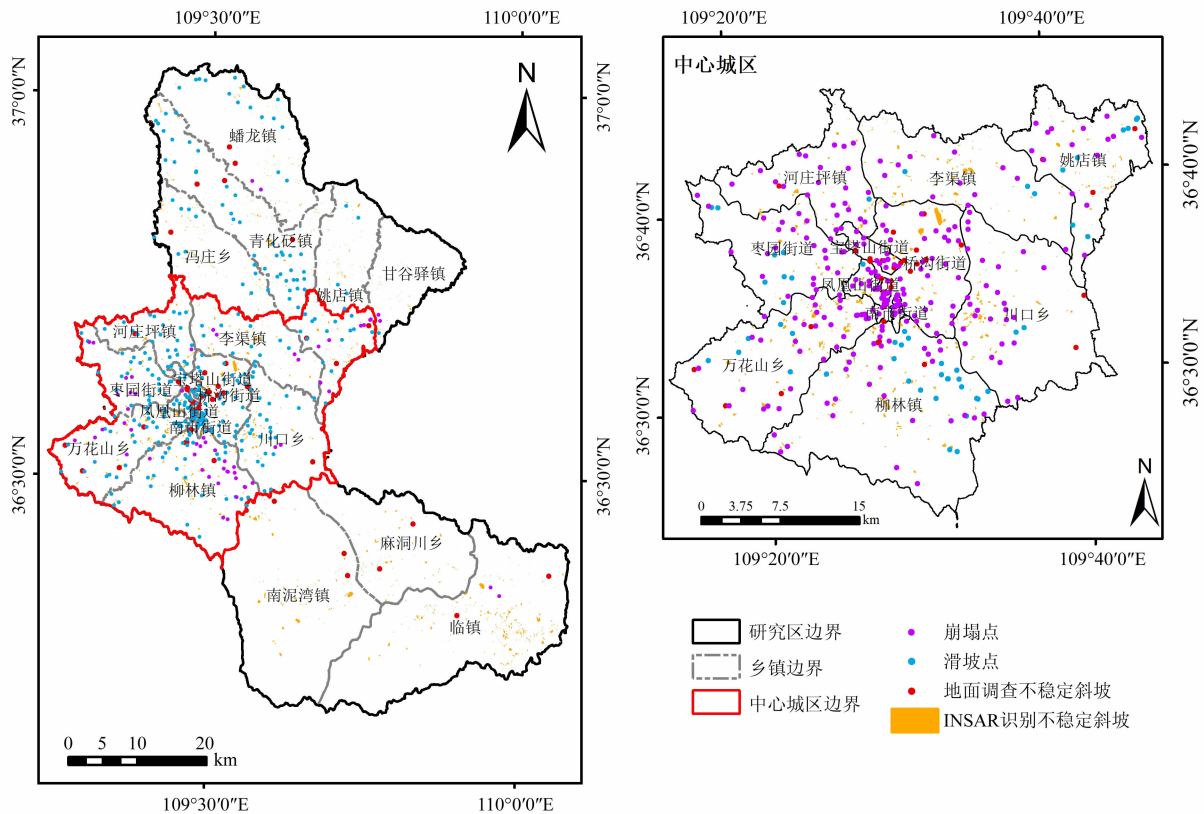


图2 宝塔区地质灾害分布图

Fig. 2 Geo-hazard distribution map in Baota District

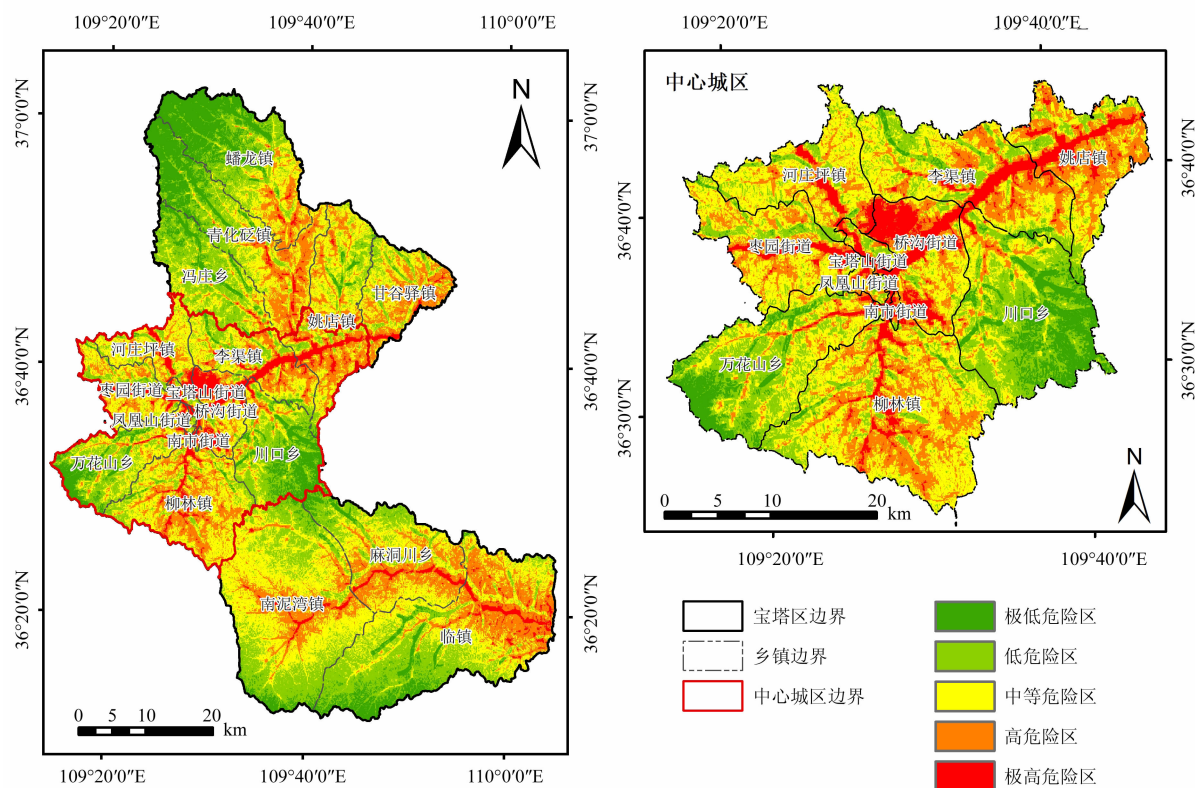


图3 宝塔区地质灾害危险性分区图

Fig.3 Fatalness mapping in Baota District

枣园街道。这与以上区域内人口密度大、河流较发育、地质环境恶劣、人类活动较为频繁、滑坡和崩塌充分发育、灾害密度相对较大有关。中等危险区分布最广,面积达 1156.35 km^2 , 占区域总面积的 34.77% , 主要分布在宝塔区北部的姚店镇和甘谷驿镇、宝塔区南部的南泥湾镇以及中心城区的河庄坪镇,在其他乡镇也有零星的分布。低危险区和极低危险区面积分别占研究区总面积的 26.84% 和 12.06% , 主要分布在宝塔区的南部、北部以及中心城区的川口乡,这与区内人类活动少、植被发育、人口密度较低、交通较不发达、人类工程活动较少有关。将本结果与薛强^[29]利用信息量法和模糊综合评判法对宝塔区地质灾害危险性评价结果对比,发现2种不同方法的评价结果相近,其中危险性较高地区分布位置相同,都分布在中部地区,说明本文评价结果具有可靠性。

宝塔区中心城区中极低危险区和低危险区面积为 367.33 km^2 , 占中心城区面积的 33.26% ; 中等危险区面积为 601.39 km^2 , 占中心城区面积的 54.46% ; 高危险区和极高危险区面积为 135.66 km^2 , 占中心城

区面积的 12.28% , 主要分布在桥沟街道、李渠镇东南部,部分分布在姚店镇、枣园街道。

4.2 地质灾害易损性评价结果

利用以上方法对宝塔区地质灾害易损性进行了评价,并将评价结果分为极低易损区、低易损区、中等易损区、高易损区以及极高易损区。由图4可知,宝塔区易损性较高的区域集中在宝塔区中心城区和北部,东部和南部区域的地质灾害易损性较低。

其中,宝塔区高易损区和极高易损区面积约 503.34 km^2 , 约占全区面积的 15.14% , 主要分布在宝塔区中心城区的姚店镇、桥沟街道、柳林镇、万花山乡等乡镇。这与区内人口密度大,建筑用地面积大,崩塌点密度大密切相关。中等易损区面积约 1099.35 km^2 , 占全区面积的 33.05% , 主要分布在宝塔区北部的蟠龙镇和青化砭镇,中心城区的李渠镇也有分布。低易损区面积约 1337.55 km^2 , 占全区面积的 40.21% , 主要分布在宝塔区北部的冯庄乡、甘谷驿镇和宝塔区南部的南泥湾镇、临镇。极低易损区面积约 385.75 km^2 , 占全区面积的 11.60% , 主

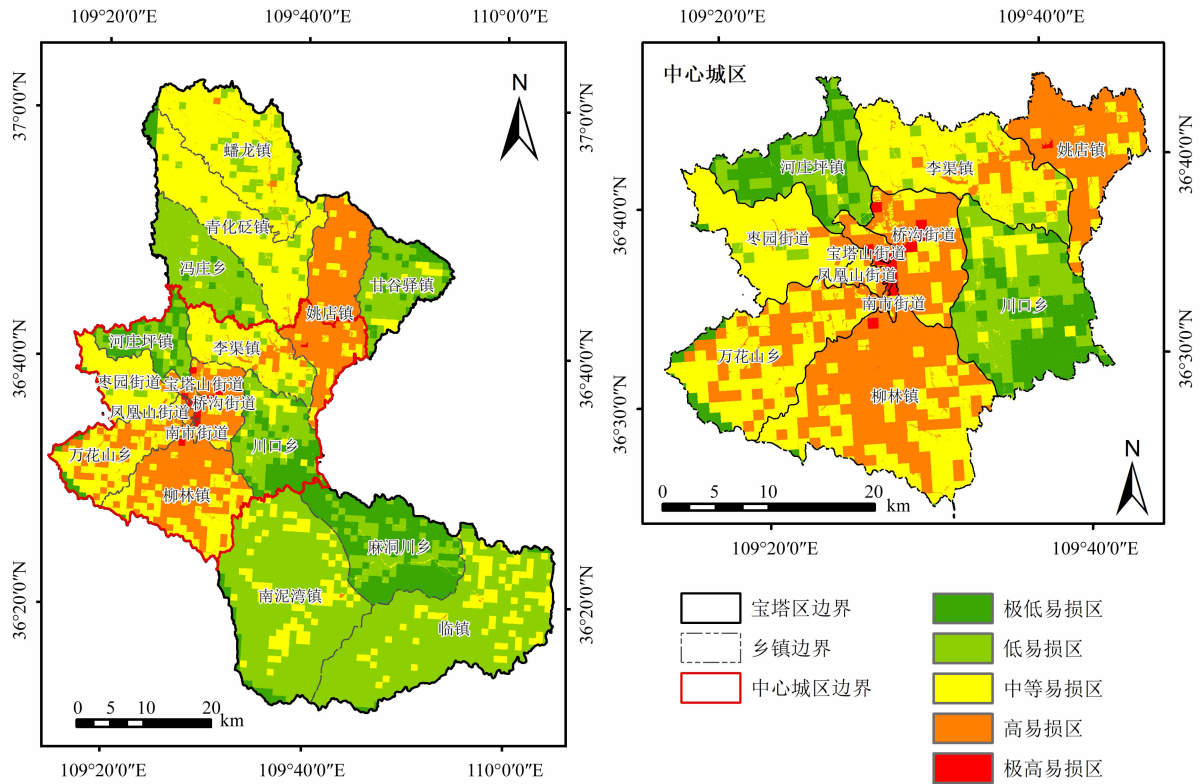


图4 宝塔区地质灾害易损性分区图

Fig.4 Vulnerability mapping in Baota District

要分布在宝塔区南部的麻洞川乡和川口乡南部。

宝塔区中心城区中极低易损区和低易损区面积为 412.33 km^2 , 占中心城区面积的 37.65% ; 中等易损区面积为 436.55 km^2 , 占中心城区面积的 39.86% ; 高易损区和极高易损区面积为 246.40 km^2 , 占中心城区面积的 22.50% , 主要分布在姚店镇、南市街道、柳林镇及凤凰山街道。

4.3 地质灾害风险评价结果

在地质灾害危险性和易损性评价的基础上, 利用地质灾害风险评价模型, 计算宝塔区地质灾害风险度, 并将研究区划分为极高风险区、高风险区、中等风险区、低风险区、极低风险区 5 个地质灾害风险区。由图 5 可知, 宝塔区地质灾害风险评价结果的空间特征较为明显; 其中, 中心城区的地质灾害风险较高, 南部和北部区域的地质灾害风险较低, 延河流域海拔较低的沟谷地带是研究区地质灾害高风险聚集区。

其中, 宝塔区地质灾害极高风险区面积约 33.92 km^2 , 占总面积的 1.02% , 主要分布在中心城

区的桥沟街道与柳林镇和宝塔山街道交界处、延河两岸地区, 姚店镇中部也有分布。地质灾害高风险区面积约 307.95 km^2 , 占总面积的 9.24% , 主要分布在中心城区的桥沟街道、柳林镇和姚店镇, 局部分布在枣园街道东部、李渠镇中部、万花山乡东部区域。宝塔山街道和桥沟街道的高风险性是由这两个区域的高危险性和高易损性决定的, 与姚店镇南部的高风险性原因不同, 姚店镇南部主要是由于该地区的高风险性决定的。地质灾害中等风险区面积 720.20 km^2 , 占总面积的 21.60% , 主要分布在宝塔区北部的蟠龙镇和青化砭镇、中心城区的柳林镇、桥沟街道、姚店镇、局部分布在枣园街道、万花山乡、李渠镇南部。地质灾害低风险区面积 1088.64 km^2 , 占总面积的 32.62% , 主要分布在宝塔区北部的甘谷驿镇、青化砭镇、蟠龙镇、冯庄乡和宝塔区南部的李渠镇、临镇、南泥湾镇、麻洞川乡以及中心城区的万花山乡、枣园街道。地质灾害极低风险区面积 1183.77 km^2 , 占总面积的 35.50% , 主要分布在宝塔区北部的冯庄乡、甘谷驿镇、青化砭镇, 宝塔

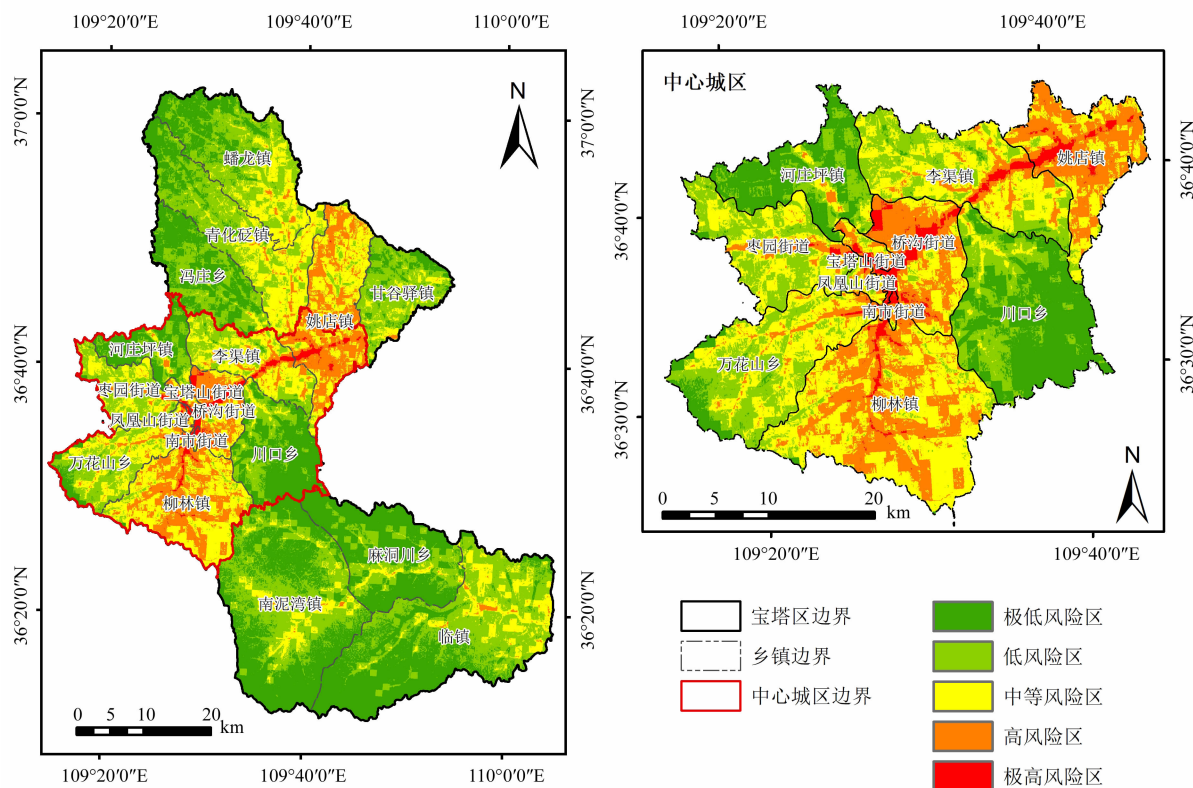


图5 宝塔区地质灾害风险分区图

Fig. 5 Risk mapping in Baota District

区南部的麻洞川乡、南泥湾镇以及中心城区的川口乡、河庄坪镇、万花山乡。

宝塔区中心城区中极低风险区面积为 273.70 km^2 , 占中心城区面积的 24.67% ; 低风险区面积为 418.68 km^2 , 占中心城区面积的 37.74% ; 中等风险区面积为 324.48 km^2 , 占中心城区面积的 29.25% ; 高风险区面积为 82.42 km^2 , 占中心城区面积的 7.43% , 主要分布在桥沟街道、柳林镇和姚店镇, 局部分布在枣园街道东部、李渠镇中部、万花山乡东部区域; 极高风险区面积为 10.06 km^2 , 占中心城区面积的 0.91% , 该区主要集中在桥沟街道与宝塔山街道交界处以及延河两岸地区。

5 结论与讨论

本文充分考虑宝塔区的自然因素和社会因素, 根据地质灾害风险评价的目的和要求, 构建延安市宝塔区地质灾害危险性和易损性评价指标体系, 基于地质灾害风险评价模型, 开展了宝塔区地质灾害风险评价研究。主要结论分述如下:

(1) 宝塔区中心城区危险性较高, 南部和北部地区危险性较低, 海拔较低的沟谷地带是地质灾害高危险性聚集区。高易损区和极高易损区主要分布于宝塔区中心城区和北部。

(2) 宝塔区中心城区地质灾害风险较高, 南部和北部相对较低。研究区地质灾害风险中等及以上水平的区域面积达 1062.07 km^2 , 主要分布在宝塔区中心城区, 其中极高风险区和高风险区面积分别为 33.92 km^2 和 307.95 km^2 , 主要集中在中心城区的桥沟街道、宝塔山街道、柳林镇和姚店镇。

(3) 宝塔区中心城区中高风险区面积为 82.42 km^2 , 占中心城区面积的 7.43% ; 极高风险区面积为 10.06 km^2 , 占中心城区面积的 0.91% , 该区主要集中在延河两岸地区。

(4) 宝塔区高风险区以上等级区域不仅地质灾害隐患点多, 不稳定斜坡危害区域面积占比大、居民点数多, 且人口密度大, 社会经济发展水平相对较高, 是该区急需开展地质灾害监测、预警和防治的重点地区。

本研究在宝塔区地质灾害历史统计数据基础上,结合分辨率较高的 SBAS-InSAR 地表形变监测数据,将不稳定斜坡危害区域面积加入危险性指标体系,不稳定斜坡危害区域内居民点数纳入易损性评价指标体系,进而完善了该类地区地质灾害风险评价指标体系,提高了风险评价的精度和准确度。但本研究也存在不足,其中,由于研究区自然环境背景的特殊性,评价指标体系和结果仅适用于该研究区,缺乏普适性;其次,评价指标的权重来自专家打分法,带有一定的主观性。基于此,今后将不断完善评价指标体系,并采用多种权重赋值方法开展研究区的地质灾害的风险评价的比较研究,找到更接近实际情况的评价方法。此外,由于数据的可获得性等原因,没有考虑自然与人类活动有关的动态因素的影响,今后将进一步开展相关研究,实现动态的区域地质灾害风险评价,为研究区地质灾害风险防控和防灾减灾工作提供决策依据。

参考文献 (References)

- [1] 徐继维, 张茂省, 范文. 地质灾害风险评估综述[J]. 灾害学, 2015, **30**(4): 130 - 134. [XU Jiwei, ZHANG Maosheng, FAN Wen. An overview of geological disaster risk assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2015, **30**(4): 130 - 134]
- [2] 张春山, 吴满路, 张业成. 地质灾害风险评价方法及展望[J]. 自然灾害学报, 2003, **12**(1): 96 - 102. [ZHANG Chunshan, WU Manlu, ZHANG Yecheng. Method and prospect of geological disaster risk assessment [J]. Journal of Natural Disasters, 2003, **12**(1): 96 - 102]
- [3] 卢全中, 彭建兵, 赵法锁. 地质灾害风险评估(价)研究综述[J]. 灾害学, 2003, **18**(4): 60 - 64. [LU Quanzhong, PENG Jianbing, ZHAO Fasuo. An overview on the study of risk assessment of geological hazards [J]. Journal of Catastrophology, 2003, **18**(4): 60 - 64]
- [4] 齐信, 唐川, 陈州丰, 等. 地质灾害风险评价研究[J]. 自然灾害学报, 2012, **21**(5): 33 - 40. [QI Xin, TANG Chuan, CHEN Zhoufeng, et al. Research of geohazards risk assessment [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, **21**(5): 33 - 40]
- [5] OHLMACHER G C, DAVIS J C. Using multiple regression and GIS technology to predict landslide hazard in Northeast Kansas [J]. Engineering Geology, 2003, **69**(3): 331 - 343.
- [6] LEE S, CHOI J, et al. Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, **25**(11): 2037 - 2052.
- [7] PRADHAN B, LEE S. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, **60**(5): 1037 - 1054.
- [8] 朱良峰, 殷坤龙, 张梁, 等. GIS 支持下的地质灾害风险分析[J]. 长江科学院院报, 2002, **19**(5): 43 - 46. [ZHU Liangfeng, YIN Kunlong, ZHANG Liang, et al. Risk analysis system of geo-hazards supported by GIS [J]. Journal of the Yangtze River Academy of Sciences, 2002, **19**(5): 43 - 46]
- [9] 吴森, 张占成, 周光红, 等. 基于贡献率模型的汶川县滑坡灾害的易损性评价[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2013, **35**(3): 69 - 74. [WU Sen, ZHANG Zhancheng, ZHOU Guanghong, et al. Landslide vulnerability assessment in Wenchuan County based on contributing weight model [J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2013, **35**(3): 69 - 74]
- [10] 赵良军, 李虎, 刘玉锋, 等. 新疆伊犁果子沟地质灾害风险评价及其致灾因子[J]. 干旱区研究, 2017, **34**(3): 693 - 700. [ZHAO Liangjun, LI Hu, LIU Yufeng, et al. Evaluation on geological hazard risk and disaster-causing factors in the Guozigou valley in Ili, Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2017, **34**(3): 693 - 700]
- [11] 徐瑞池, 李秀珍, 胡凯衡, 等. 横断山区山地灾害的动态风险性评价[J]. 山地学报, 2020, **38**(2): 222 - 230. [XU Ruichi, LI Xiuzhen, HU Kaiheng, et al. A dynamic risk assessment for mountain hazards in the Hengduan Mountain Region, China [J]. Mountain Research, 2020, **38**(2): 222 - 230]
- [12] 张毅. 基于 InSAR 技术的地表变形监测与滑坡早期识别研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018: 5 - 7. [ZHANG Yi. Detecting ground deformation and investigating landslides using InSAR technique[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018: 5 - 7]
- [13] CHEN Guan, ZHANG Yi, ZENG Runqiang, et al. Detection of land subsidence associated with land creation and rapid urbanization in the Chinese Loess Plateau using time series InSAR: a case study of Lanzhou New District [J]. Remote Sensing, 2018, **10**(2): 270.
- [14] 张茂省, 校培喜, 魏兴丽. 延安市宝塔区崩滑地质灾害发育特征与分布规律初探[J]. 水文地质工程地质, 2006, **33**(6): 72 - 74, 79. [ZHANG Maosheng, XIAO Peixi, WEI Xingli. A preliminary discussion of the occurrence of landslide in the Baota District of Yan 'an city, Chian [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, **33**(6): 72 - 74, 79]
- [15] 薛强, 张茂省, 李林. 基于斜坡单元与信息量法结合的宝塔区黄土滑坡易发性评价[J]. 地质通报, 2015, **34**(11): 2108 - 2115. [XUE Qiang, ZHANG Maosheng, LI Lin. Loess landslide susceptibility based on slope unit and information value method in Baota District, Yan 'an city, Chian [J]. Geological Bulletin of China, 2015, **34**(11): 2108 - 2115]
- [16] 张晓东. 基于遥感和 GIS 的宁夏盐池县地质灾害风险评价研

- 究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018:150. [ZHANG Xiaodong, Study on geological disaster risk assessment based on RS and GIS in Yanchi County, Ningxia[D]. Beijing: University of Geosciences (Beijing),2018:150]
- [17] 单博. 基于3S技术的奔子栏水源库岸地质灾害易发性评价及灾害风险性区划研究[D]. 长春:吉林大学,2014:93. [SHAN Bo. Reservoir bank geological Disaster susceptibility assessment and study on zoning of disaster risk in Benzilan Water-source reservoir area based on 3S technology[D]. Changchun: Jilin University, 2014:93]
- [18] 张茂省. 黄土地质灾害影响因素研究[J]. 工程地质学报, 2007,15(s1):133-140. [ZHANG Maosheng. Controlling and triggering factors of Loess geo-hazards[J]. Journal of Engineering Geology, 2007,15(S1):133-140]
- [19] 孙萍萍,张茂省,程秀娟,等. 黄土高原地质灾害发生规律[J]. 山地学报,2019,37(5):737-746. [SUN Pingping, ZHANG Maosheng, CHENG Xiujuan, et al. On the regularity of geological hazards on the Loess Plateau in China[J]. Mountain Research, 2019,37(5):737-746]
- [20] 牛全福. 基于GIS的地质灾害风险评估方法研究[D]. 兰州:兰州大学,2011:92. [NIU Quanfu. Study on the method of geological disaster risk assessment based on GIS[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2011:92]
- [21] 牛全福,程维明,兰恒星,等. 基于信息量模型的玉树地震次生地质灾害危险性评价[J]. 山地学报,2011,29(2):117-123. [NIU Quanfu, CHENG Weiming, LAN Hengxing, et al. Susceptibility assessment of secondary geological disaster based on information value methodology for Yushu earthquake region[J]. Mountain Research, 2011,29(2):117-123]
- [22] 赵富萌,张毅,孟兴民,等. 基于小基线集干涉测量的中巴公路盖孜河谷地质灾害早期识别[J]. 水文地质工程地质, 2020,47(1):142-152. [ZHAO Fumeng, ZHANG Yi, MENG Xingmin, et al. Geological hazards early identification in the Gaizi valley of Karakoran Highway based on SBAS-InSAR technology[J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2020,47(1):142-152]
- [23] 郭长宝,唐杰,吴瑞安,等. 基于证据权模型的川藏铁路加查—朗县段滑坡易发性评价[J]. 山地学报,2019,37(2):240-251. [GUO Changbao, TANG Jie, WU Ruian, et al. Landslide susceptibility assessment based on WOE model along Jiacha-Langxian County section of Sichuan-Tibet Railway, China[J]. Mountain Research,2019,37(2):240-251]
- [24] 许强,张一凡,陈伟. 西南山区城镇地质灾害易损性评价方法——以四川省丹巴县城为例[J]. 地质通报,2010,29(5):729-738. [XU Qiang, ZHANG Yifan, CHEN Wei. Vulnerability assessment of geo-hazards in southwest mountainous area—Danba County, Sichuan, China as an example[J]. Geological Bulletin of China,2010,29(5):729-738]
- [25] 岳东霞,李凯,张佳静,等. 基于RS和广义目标函数法的清水沟地质灾害承灾体易损性评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2014,50(5):671-675. [YUE Dongxia, LI Kai, ZHANG Jiajing, et al. Vulnerability of the hazard-bearing body to geo-hazards based on RS and generalized objective function method in Qingshui Watershed[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2014,50(5):671-675]
- [26] 符彦,王剑辉,杨斌. 基于升降轨SBAS-InSAR技术的城市地区地表沉降监测[J]. 地理信息世界,2019,26(2):118-123. [FU Yan, WANG Jianhui, YANG Bin. Monitoring the surface subsidence in the urban region with SBAS-InSAR technology[J]. Geographic Information World, 2019,26(2):118-123]
- [27] 张春山,何淑军,辛鹏,等. 陕西省宝鸡市渭滨区地质灾害风险评价[J]. 地质通报,2009,28(8):1053-1063. [ZHANG Chunshan, HE Shujun, XIN Peng, et al. Risk evaluation of geological hazards in Wein District, Baoji city, Shanxi Province, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009,28(8):1053-1063]
- [28] 李杰,何云玲,刘雪莲. 基于均方差决策法的区域资源环境承载力研究——以陆良县为例[J]. 云南地理环境研究,2016,28(5):54-60. [LI Jie, HE Yunling, LIU Xuelian. Evaluation of regional resources and environment carrying capacity based on mean square decision-making method-taking Luliang County as an example[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2016,28(5):54-60]
- [29] 薛强. 延安宝塔区地质灾害危险性评价研究[D]. 西安:西安科技大学,2008:53-54. [XUE Qiang. The study on geographical hazard evaluation of Baota district in Yan'an city[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology, 2008:53-54]

Risk Assessment of Geological Hazards in Baota District, Yan'an City, Shanxi, China

YANG Liu, MU Xinliang, LI Chen, ZHENG Xu, YUE Dongxia*

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Baota District of Yanan city lies on the Loess Plateau, where landslides, collapses and other geohazards occur quite often, posing serious threat to the safety of local communities. Based on modern remote sensing and GIS technology, this research was conducted by using SBAS-InSAR surface deformation monitoring data with reference to historical data analysis of geohazards and past research achievements. The optimized index systems for evaluation of geohazard risk particularly suitable for Baota District were established by taking account of the significance of potential threat of unstable slopes to settlements, where the percentage of unstable slope area to total areas of the study was introduced into the improved risk index system, and further the number of residents living in unstable slope areas was included into the vulnerability evaluation index system. Consequently, a geohazard risk assessment with a higher resolution of 30m grid as a unit was completed in Baota District for verification of compliance with observation. The results show: The risk of geohazard was higher in the central part of Baota District, lower in the south and north; Baota District can be delineated into five danger zones, extremely high risk, high risk, medium risk, low risk and very low risk, accounting for 1.02%, 9.24%, 21.60%, 32.62% and 35.50% of the total study area respectively. The area with medium risk and above in the study area was 1062.07 km², and the area of extremely high-risk and high-risk areas was 33.92 km² and 307.95 km² respectively, which were mainly distributed in the middle of Yanhe River basin as well as northern areas of Baota District. The extremely low-risk areas were mainly distributed in the northern part of Baota District and southern Fenchuan River basin. The optimization of risk evaluation of geohazards in Baota District by this study has improved the accuracy of risk management in the area, and it would provide a basis for risk prevention and land space planning in Baota District and provide an appropriate approach to risk assessment of geohazard in similar areas.

Key words: geo-hazard; Baota District; fatalness assessment; vulnerability assessment