

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.002.

刘仪航, 韩剑桥, 谢梦霞, 等. 基于 GIS 与 AHP 集成的黄土高原洪水灾害风险评估[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 129-134.

LIU Yihang, HAN Jianqiao, XIE Mengxia, et al. Risk Assessment of Flood Disaster on the Loess Plateau Based on Integration of GIS and AHP [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 129-134.

# 基于 GIS 与 AHP 集成的黄土高原洪水灾害风险评估

刘仪航<sup>1</sup>, 韩剑桥<sup>1,2</sup>, 谢梦霞<sup>1</sup>, 尚天赦<sup>1</sup>, 赵小丽<sup>1</sup>, 戈文艳<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**为识别黄土高原洪水灾害高风险地区及其分布特征, 基于地形、NDVI、降雨以及社会经济数据, 集成 GIS 与层次分析法(AHP)等方法, 在绘制洪水灾害危险图和易损图的基础上, 综合评估了黄土高原不同地区的洪水灾害风险。结果表明: (1) 黄土高原整体风险程度为中等。中风险性地区所占面积比例最高, 约为 29.2%; 较高和高风险性地区所占比例为 19.9%, 5.7%, 低和较低风险性地区所占比例为 17.5%, 27.7%。 (2) 洪水灾害危险性、易损性、风险性等级均呈现出由东南部向西北部递减的变化特征。洪水灾害风险程度为高和较高的地区主要集中在西安市、咸阳市、郑州市及榆林市等地区。 (3) 气候特点、NDVI 及社会经济发展等是决定黄土高原洪水灾害风险程度的关键因素, 在防灾减灾规划设计中需重点关注。综上, 洪水灾害高风险区主要集中在黄土高原中部、南部等地区, 与历史洪水灾害结果大致相符。

**关键词:**洪水灾害; 危险性; 易损性; 风险性; 黄土高原

中图分类号: P954

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0129-06

## Risk Assessment of Flood Disaster on the Loess Plateau Based on Integration of GIS and AHP

LIU Yihang<sup>1</sup>, HAN Jianqiao<sup>1,2</sup>, XIE Mengxia<sup>1</sup>, SHANG Tianshe<sup>1</sup>, ZHAO Xiaoli<sup>1</sup>, GE Wenyan<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to identify the high-risk areas of flood disaster and their distribution characteristics on the Loess Plateau, based on terrain, NDVI, rainfall and socio-economic data, integrated GIS and analytic hierarchy process (AHP), the risk of flood disaster in different areas of the Loess Plateau was comprehensively evaluated on the basis of drawing flood hazard maps and vulnerability maps. The results show that: (1) the overall risk degree of Loess Plateau was medium; middle-risk areas accounted for the highest proportion, about 29.2%; the proportions of high and higher risk areas were 19.9% and 5.7%, and those of low and low risk areas were 17.5% and 27.7%; (2) the flood hazard, vulnerability and risk all showed the decreasing trend from southeast to northwest; the areas with high flood risk were mainly located in Xi'an, Xianyang, Zhengzhou and Yulin; (3) climate characteristics, NDVI and social and economic development are the key factors that determine the risk degree of flood disaster on the Loess Plateau, which should be paid more attention to in the planning and design of disaster prevention and mitigation. In conclusion, the high risk areas of flood disasters mainly concentrated in the central and southern regions of the Loess Plateau, which was roughly consistent with the results of historical flood disasters.

**Keywords:** flood disaster; hazard; vulnerability; risk; Loess Plateau

收稿日期: 2021-11-05

修回日期: 2022-01-07

资助项目: 国家自然科学基金(42177327); 中国科协青年人才托举工程项目(2019-2021QNRC001)

第一作者: 刘仪航(1998—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持环境效益评价。E-mail: 1242849693@qq.com

通信作者: 韩剑桥(1987—), 男, 河南禹州人, 博士, 副研究员, 主要从事流域洪水泥沙与环境研究。E-mail: hjq13@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

洪水灾害是当今世界上最严重的自然灾害之一,我国约有50%的人口和70%的财产受到洪水的威胁<sup>[1-2]</sup>。黄土高原生态环境脆弱,暴雨频发,更易发生洪水灾害<sup>[3]</sup>。如2017年“7·26”特大暴雨引发的洪水造成榆林市43.25万人受灾,经济损失达到89亿元<sup>[4]</sup>。21世纪以来,气候变化造成极端暴雨呈频发态势,加上人类活动的影响,两者叠加进一步加剧了洪水灾害风险。因此,对黄土高原进行洪水灾害风险评估,识别出高风险地区,有利于科学制定黄土高原防洪减灾规划,促进水资源的合理利用和社会的健康稳定可持续发展<sup>[5]</sup>。

已有研究<sup>[6-7]</sup>采用历史灾情统计、水文水动力模型、综合评价等方法对洪水灾害风险进行评估<sup>[8]</sup>。如,哈斯也提·热合曼等<sup>[9]</sup>统计分析了1949—2019年新疆主要洪水灾害的经济损失与受灾人口,发现了因灾死亡人口以及直接经济损失所占GDP比重不断减小的规律。基于历史灾情评价法是对既发灾情的结果与分析,但不能深入揭示洪灾的发生机理。水文水动力模型主要应用于一定流域范围,在较大尺度上应用难度较大<sup>[8]</sup>。综合评价法主要考虑洪灾的自然属性和社会属性,即从致灾因子、孕灾环境、承灾体等方面选取指标,建立评估体系对灾害风险进行评估。这种方法层次性强,但各风险指标的权重易受主观性影响。廖丹霞等<sup>[10]</sup>基于GIS平台,从影响洪水风险的各个方面选取指标,对河北省滦县的洪水灾害综合风险进行了评价,认为滦县东南部的洪水高风险较集中。Cai等<sup>[11]</sup>利用模糊综合评价和水动力模型对江西宜丰县进行了洪水灾害风险评估,发现多指标模糊综合评价模型与水动力模型计算结果相比,当遭遇50年一遇的洪水时,极高风险区面积会减小,其余风险区面积略有增加。在黄土高原地区,已有研究主要针对小区域和中小尺度的流域<sup>[12-13]</sup>,运用洪水灾害风险评估模型或水动力学模型来评估洪水灾害,缺少大区域尺度的研究成果,不利于提出宏观的洪水灾害应对策略。

为此,本文以黄土高原为研究区,选取洪水灾害形成的自然因素和社会因素等指标,基于层次分析法(AHP)增加风险指标权重的科学性,借助GIS平台研究了黄土高原洪灾发生的潜在危险以及所造成的潜在损失,并分析不同风险程度位置的空间分布特点及其主要影响因素,识别出洪水灾害的高风险区,以期为黄土高原乃至黄河流域的防灾减灾和高质量发展提供支撑。

## 1 研究区概况

黄土高原(33°43′—41°16′N,100°54′—114°33′E)位

于黄河流域中部,总面积约为 $6.24 \times 10^5 \text{ km}^2$ <sup>[14]</sup>,横跨7个省,涉及396个区县。黄土高原地势起伏较大,海拔为85~5 300 m,气候为大陆性季风气候,年平均降雨量为150~750 mm,总的趋势是东南向西北递减,且汛期易发暴雨。黄土高原区域水系以黄河为骨干,各级支流约200条,河网密度差异较大<sup>[15]</sup>。黄土高原的人口密度分布不均匀,总体由东南向西北部递减,经济发展缓慢,两级分化较严重,东部地区的经济比西部发展较快。黄土高原的耕地面积为 $1.54 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占总土地面积的24.85%。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

(1) 地形数据为90 m的SRTMDem高程数据,来自于地理空间数据云。基于ArcGIS平台,计算得到坡度、坡向、地势起伏和河网密度<sup>[15]</sup>。

(2) 降雨数据是精度为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的GLDAS\_CLSM025\_D2.0的日降雨量数据,时间跨度为1948—2014年,来源于GES DISC网站。GLDAS的输出产品分辨率高,获取不同地区降水时空特征较为方便,且与气象站点数据具有极高的相关性,可为气象缺测地区提供数据参考,可靠性较高<sup>[16]</sup>。本文采用Matlab计算获取了1948—2014年黄土高原多年平均最大连续3天降雨量数据。

(3) NDVI数据来源于NASA网站,分辨率为250 m,16天最大值合成的反射率数据,本文选用2020年黄土高原NDVI数据。

(4) 社会经济数据:从黄土高原396个区县的统计年鉴和人民政府网上获取2016—2018年各区县的耕地面积、GDP和人口密度数据,经过统计分析,最终得出黄土高原各区县的单位耕地面积、单位面积GDP和人口密度数据。

(5) 历史洪水灾害数据:通过中国知网检索,2010年以来,黄土高原区域内发生过的洪水灾害的事件,共54次<sup>[17]</sup>。

### 2.2 研究方法

2.2.1 理论基础与评估指标选取 洪水的致灾因子、孕灾环境和承灾体相互作用,是洪水灾害风险评估的理论基础<sup>[5]</sup>。致灾因子和孕灾环境反映的是灾害风险的自然属性,构成了洪水的危险性;承灾体反映的是灾害风险的社会属性,构成了洪水的易损性<sup>[10]</sup>。因此洪水灾害风险是危险性和易损性的综合结果<sup>[18]</sup>。

洪水灾害危险性涉及多个自然因素<sup>[10]</sup>。其中暴雨是影响洪水的关键因素,此外,地形起伏、植被覆盖、河流也会影响到洪水的生成、汇集和演进。结合

已有研究成果<sup>[19-20]</sup>,选取高程、坡度、坡向、地势起伏、河网密度、最大 3 天降雨量、NDVI 作为危险性评价指标。洪水灾害易损性主要考虑承灾体的社会经济发展状况<sup>[10]</sup>。人是洪水灾害承受的主体,可以反映受灾程度。衡量一个区域经济的发展情况,单位面积 GDP 值是最直接的体现方法。耕地与粮食安全密切相关,是洪水致灾的重要指标。因此,选取人口密度、单位面积 GDP、耕地单位面积作为易损性评价指标<sup>[20]</sup>(表 1)。

表 1 黄土高原洪水灾害风险性评估因子及其权重

风险因子	子因子	指标	指标权重	风险因子权重
危险性	致灾因子	最大 3 天降雨量	0.424	0.5
		河网密度	0.164	
	孕灾环境	高程、坡度、坡向、地势起伏	0.201	
		NDVI	0.211	
易损性	承灾体	人口密度	0.333	0.5
		单位面积 GDP	0.333	
		耕地单位面积	0.333	

2.2.2 洪水灾害风险评估指标体系 本研究运用层次分析法来确定指标的权重<sup>[8]</sup>。层次分析法是通过对比同级多个指标的重要性程度,判定其权重大小,反映不同指标对相关因子的相对重要性<sup>[21]</sup>。本研究各个指标权重见表 1<sup>[20]</sup>。各个指标在进行叠加前,需要利用公式(1)对所有指标进行标准化处理。

$$x_{i+1} = \frac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}}$$

(1)

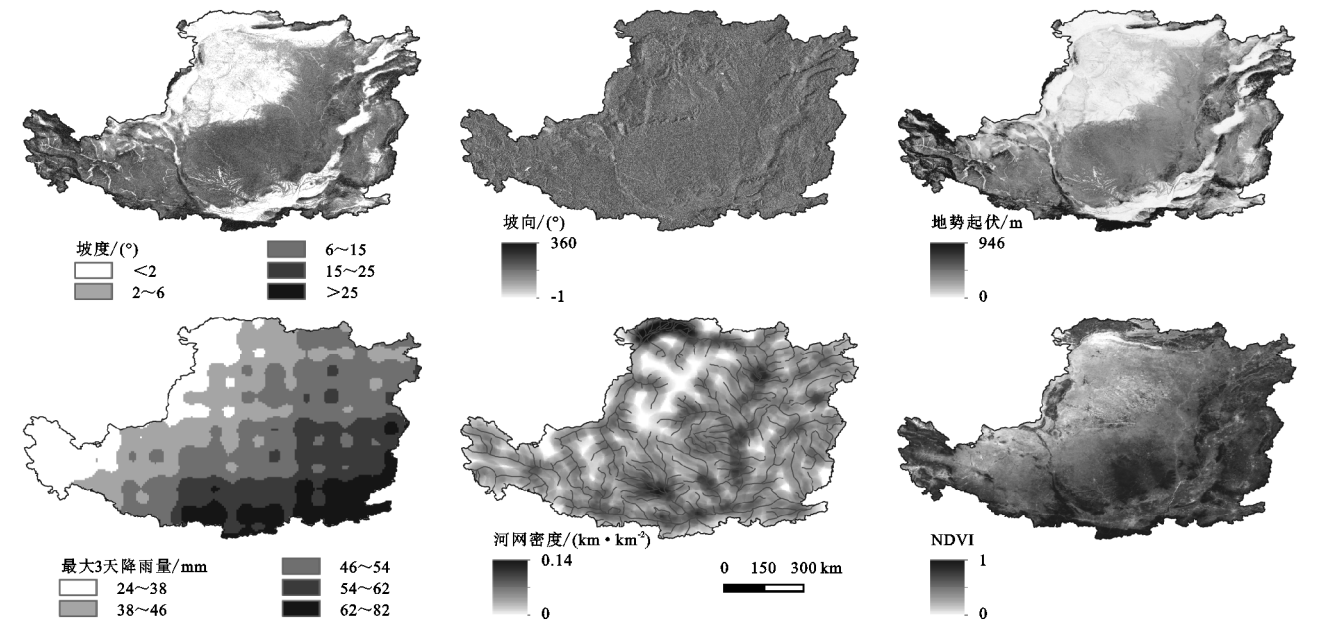


图 1 黄土高原地形、气候、水系和植被因子的空间分布

3.1.2 危险性评估结果 根据上述因子,计算得到危险性评估结果见图 2。黄土高原大部分地区呈中等危险性的面积为  $1.867 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占总面积的 29.9%; 高危险

式中:  $x_{i+1}$  为指标经标准化后的量化值;  $x_i$  为指标量化前的原始值;  $x_{i\min}$  为指标的最小值;  $x_{i\max}$  为指标的最大值<sup>[22]</sup>。

洪水灾害风险是危险性和易损性的综合结果,在 GIS 中分别对洪水灾害危险性和易损性进行分析,然后根据公式(2)计算洪水灾害风险<sup>[20]</sup>。

$$R = 0.5W + 0.5M$$

(2)

式中:  $R$  为洪水灾害的风险性;  $W$  为洪水灾害的危险性评估结果;  $M$  为易损性评估结果。

2.2.3 洪水灾害危险性、易损性和风险性的等级划分标准 本文以县为基本单元,通过建立洪水灾害风险评估模型,计算出各个县的洪水灾害危险性、易损性和风险性,利用自然断点法进行 3 个指标的等级划分<sup>[23]</sup>,均划分为低、较低、中等、较高和高 5 个等级。

3 结果与分析

3.1 黄土高原洪水灾害危险性评估

3.1.1 危险性指标的空间分异特征 由图 1 可知,黄土高原的坡度为  $0^\circ \sim 74^\circ$ ,坡向值为  $-1^\circ \sim 360^\circ$ ,邻域间的地势起伏较大,为  $0 \sim 946 \text{ m}$ 。黄土高原降雨量较小,1948—2014 年的平均最大 3 天连续降雨量为  $24 \sim 82 \text{ mm}$ ,呈东南向西北递减趋势。东南地区的多年平均最大 3 天连续降雨量均在  $60 \sim 82 \text{ mm}$ ,中部为  $40 \sim 60 \text{ mm}$ ,西北地区为  $24 \sim 40 \text{ mm}$ 。河网分布范围较广,河网密度最大值为  $1.4 \text{ km/km}^2$ 。黄土高原 NDVI 平均值为 0.59,由东南向西北递减。

性和低危险性所占面积分别为  $6.12 \times 10^4$ ,  $7.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占比分别为 9.8%, 11.4%; 较高危险性和较低危险性所占面积分别为  $1.511 \times 10^5$ ,  $1.543 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,

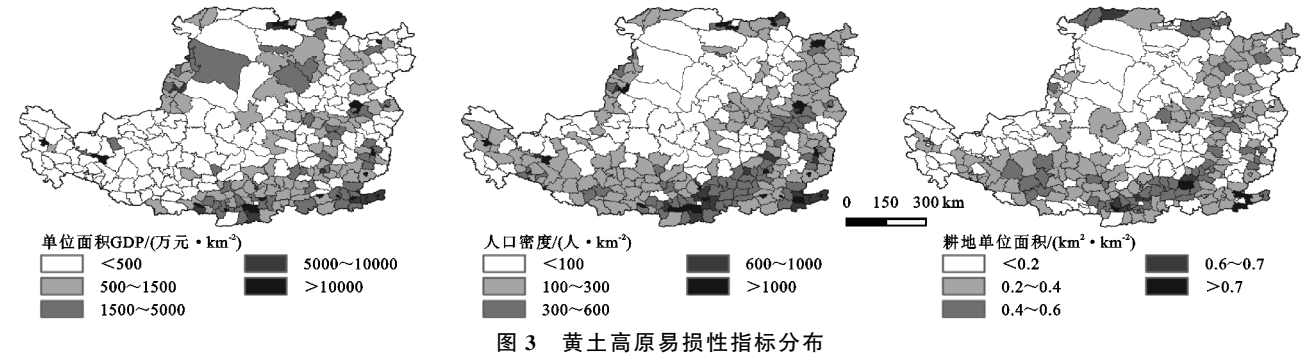


占比分别为 24.2%,24.7%。

黄土高原洪水灾害危险性由西北向东南方向递增,南部的洪水灾害危险性高于北部。中等危险性地区主要集中在黄土高原的西南部、中部和东部地区。较高危险性和高危险性地区主要分布在东南部的郑州市和南部的西安市及中部黄河干流附近等地区。

### 3.2 黄土高原洪水灾害易损性评估

3.2.1 易损性指标空间分异特征 从图 3 可以看出,黄土高原各个区县的单位面积 GDP 平均值为 1 166.52 万元/km<sup>2</sup>,大多区县的单位面积 GDP 集中在 1 500 万元/km<sup>2</sup> 以内,西安、郑州等少数地区的单位面积 GDP 在 10 000 万元/km<sup>2</sup> 以上。黄土高原各区县平均人口密



3.2.2 易损性评估结果 根据上述因子,计算得到易损性结果见图 4。黄土高原易损性呈低等级的面积为  $2.148 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占总面积的 34.4%;高易损性和较高易损性所占面积较少,分别为  $2.50 \times 10^4$ ,  $6.00 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占总面积的 4.0%,9.6%;中易损性和较低易损性所占面积为  $1.336 \times 10^5$ ,  $1.911 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 分别占总面积的 21.4%,30.6%。

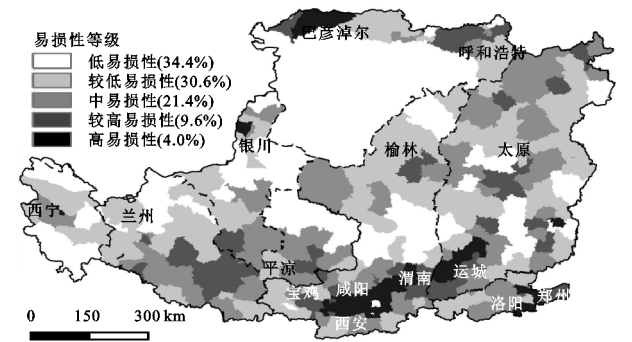


图 4 黄土高原洪水灾害易损性等级分布

易损性等级总体上呈东南部向西北部递减的变化趋势。中等易损性地区主要集中在黄土高原东北部、西南部。较高和高易损性地区主要分布在南部的西安市和东南部的郑州市以及北部巴彦卓尔等地区。

### 3.3 黄土高原洪水灾害风险性评估

根据洪水灾害危险性和易损性,叠加计算得到洪水灾害风险性评估结果,统计不同等级风险区域面积及分布如图 5—6 所示。

度为 230.81 人/km<sup>2</sup>,由东南向西北部递减,且分布不均匀。黄土高原各区县的耕地单位面积分布不均,整体由东南向西北递减,平均值为 0.25 km<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>。

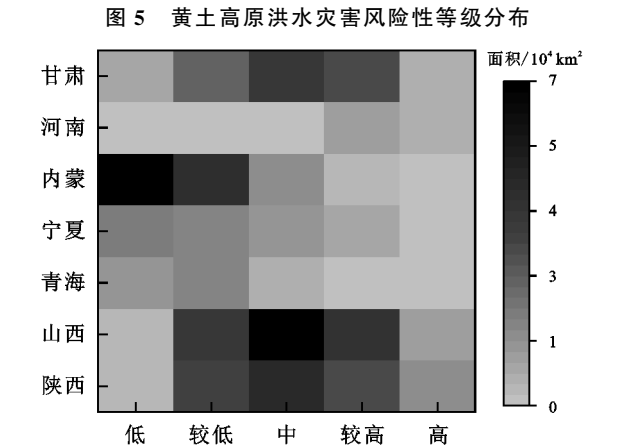
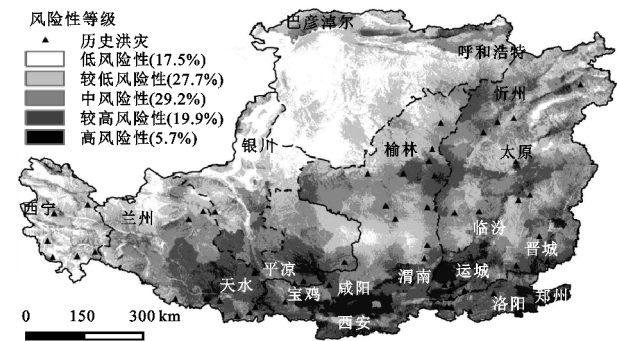
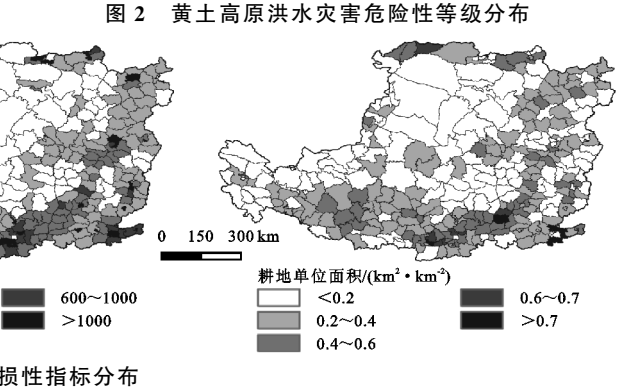
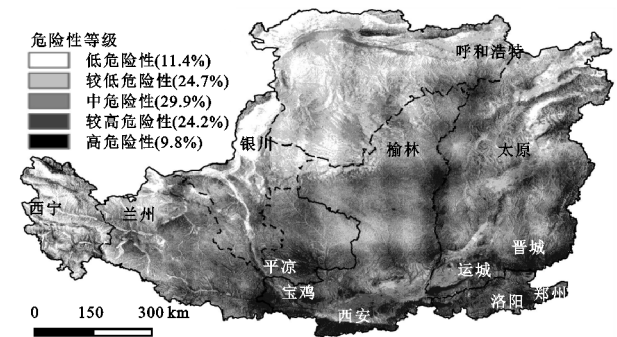


图 6 黄土高原洪水灾害风险性区域统计分布

(1) 洪水灾害呈中风险的区县占比较高,低风险和高风险占比较少。中风险地区所占面积比例约为 29.2%,低风险性和较低风险性区域所占面积比例分别为 17.5%,27.7%,较高风险性和高风险性区域所

占面积比例为19.9%,5.7%。

(2) 黄土高原洪水灾害风险性总体上呈西北向东南递增的趋势,且南部大于北部。中等风险性以下的地区主要分布在黄土高原的北部、西部以及中部;中等风险性区域涵盖了除黄土高原西北以外的大部分地区;较高风险性和高风险性主要分布在南部的西安市、咸阳市和东南部的运城市、郑州市和中部的榆林市等地区,其中郑州的风险性最高。

从各省级行政区的洪水灾害风险结果来看,内蒙古所占低风险和较低风险面积最多,分别占总面积的10.3%,6.8%;山西省所占中风险和较高风险面积最多,分别占总面积的10.5%,6.6%;陕西省所占高风险面积最多,占总面积的2.4%。

## 4 讨论

### 4.1 洪水灾害风险评估的准确性验证

根据黄土高原洪水灾害风险性等级分布图(图5),结合历史洪灾对洪水灾害风险评估的准确性进行验证。可以发现,发生洪水灾害频次较多的天水市、运城市的南部、郑州市、榆林市的南部等区域处于洪水灾害中风险区及以上。如2017年7月26日处于洪水灾害较高风险区以上的绥德县、子洲县发生特大暴雨,洪水灾害严重<sup>[24]</sup>。从历史洪水灾害与洪水灾害风险评估结果对比来看,本文的洪水灾害风险评估结果是可信的。

### 4.2 洪水灾害风险性的特征及成因

黄土高原洪水灾害危险性呈现出由东南部向西北部递减的趋势,地形、河网密度、降雨量和植被覆盖等因素对洪水灾害危险性影响较大。黄土高原洪水灾害中等危险性以下区域主要分布在西北地区的内蒙古自治区和宁夏回族自治区的部分地区,这些区域地势起伏较小,河网密度较小,降雨量少,不易形成洪水灾害。中等危险性以上的地区主要分布在西安市、洛阳市、郑州市等区域。这些地区暴雨频发,城市地区有利于洪水汇集,易造成洪水灾害<sup>[10]</sup>。

黄土高原洪水灾害易损性的变化规律与各区县的经济状况有着密切联系,在空间上呈现出由东南向西北递减的趋势。黄土高原西北大部分地区人口密度较小,单位面积GDP较低,耕地单位面积较小,洪水来临时,造成的经济损失较低,所以易损性较低。易损性等级较高的区域主要集中在陕西省的西安市、商洛市和河南省的郑州市、洛阳市,该区域的人口密度较大,单位面积GDP较高,耕地单位面积较大,一旦发生洪

水,造成的经济损失较大,故易损性等级较高。

黄土高原洪水灾害风险区域差异较大,总体呈现由东南向西北递减的变化趋势。气候特点、NDVI和社会经济发展等因素是影响风险高低的主要原因。洪水灾害中等风险性涵盖东部大部分地区及中部地区,该区域降雨量适中,社会经济发展程度一般,因此该地区遭受洪水的风险性为中等。洪水灾害风险大的区域一般伴随着降雨量、河网密度、NDVI较大以及社会经济发展较快。从综合风险来看,黄土高原洪水灾害高风险性、较高风险性主要集中在黄土高原的中部、南部和东南部地区。这些区域降雨丰沛,集中在夏季且多暴雨,土地利用类型以农田为主,社会经济发展较快。所以,一旦发生极端暴雨,该区域易发生洪水,造成的经济损失较大,风险性等级较高。

### 4.3 风险评估结果对未来防灾减灾的意义

黄土高原洪水灾害风险性较高的地方主要位于关中平原、运城市以及郑州市等地区(图5),这些区域降雨量大,社会经济发展较快。如郑州地形复杂,降雨季节与区域分布极不均匀,排洪不畅,在强降雨的影响下风险陡增。对于洪水灾害风险性较高的地区应加强堤防的建设与维护,定期进行河道清障清淤,完善防洪体系,形成防洪封闭圈,降低洪水灾害的危险性<sup>[25]</sup>。还需加大避险方案的宣传力度,编制应对暴雨洪水的应急预案,加强城镇排涝设施,降低洪水灾害的易损性<sup>[1]</sup>。对于洪水灾害风险性较低的区域,如鄂尔多斯市、西宁市等区域,应当在城市重点区域适当修建排水防洪工程,加强人民群众的防洪意识,做到防患于未然。

此外,黄土高原缺水与洪水灾害问题并存,洪水既能造成较大危害,又是一种资源。洪水资源的有效利用能够解决水资源短缺问题。对于洪水易发区,可以修建适宜的蓄滞洪区,缓解上下游干流的洪水压力,既保证洪水灾害高风险区域的防洪安全,又能留住水资源,提高洪水资源的利用程度<sup>[26]</sup>。

## 5 结论

(1) 黄土高原洪水灾害风险整体上呈现中风险性。中风险所占面积比例最高,约为29.2%,低风险性和较低风险所占面积比例分别为17.5%,27.7%,较高风险性和高风险性所占面积比例分别为19.9%,5.7%。

(2) 黄土高原洪水灾害危险性、易损性、风险性空间分布差异较大,总体由西北向东南方向递增。洪水灾害高风险和较高风险地区主要分布在南部的西安市、咸

阳市和东南部的郑州市及中部的榆林市等地区。

(3) 降雨量、NDVI 及社会经济发展等是决定黄土高原洪水灾害风险程度的关键要素,需要在制定防灾减灾规划中对这些因素进行全面的考虑。另外,洪水也是一种资源,也需要加强洪水资源化利用措施,从而实现黄土高原的社会经济与生态环境可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 胡畔,陈波,史培军.中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素[J].地理学报,2021,76(5):1148-1162.
- [2] 冉大川,齐斌,肖培青,等.佳芦河流域特大暴雨洪水对下垫面治理的响应[J].水土保持研究,2015,22(6):7-13.
- [3] 王陇,宋孝玉,李蓝君,等.黄土高原沟壑区典型小流域径流变化趋势及归因分析[J].水土保持研究,2021,28(4):48-53.
- [4] 姚文艺,侯素珍,郭彦,等.陕北绥德县、子洲县城区 2017 年“7·26”暴雨致灾成因分析[J].中国防汛抗旱,2018,28(9):27-32.
- [5] 石晓静,查小春,郭永强,等.基于 GIS 的汉江上游安康市洪水灾害风险评价[J].山东农业科学,2017,49(6):88-94.
- [6] Ntjal J, Lamptey B L, Mahamadou I B, et al. Flood disaster risk mapping in the lower Mono river basin in Togo, West Africa[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2017,23:93-103.
- [7] Nguyen H D, Fox D, Dang D K, et al. Predicting future urban flood risk using land change and hydraulic modeling in a river watershed in the central province of Vietnam[J]. Remote Sensing, 2021,13(2).DOI:10.3390/rs13020262.
- [8] 刘家福,张柏.暴雨洪灾风险评估研究进展[J].地理科学,2015,35(3):346-351.
- [9] 哈斯也提·热合曼,阮新民,库尔班·依明,等.新疆 1949—2019 年洪水灾害调查与特征分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2020,18(5):331-336.
- [10] 廖丹霞,杨波,王慧彦,等.基于 GIS 的河北省滦县洪水灾害风险评价[J].自然灾害学报,2014,23(3):93-100.
- [11] Cai T, Li X, Ding X, et al. Flood risk assessment based on hydrodynamic model and fuzzy comprehensive evaluation with GIS technique[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019,35:101077.
- [12] David A, Schmalz B. Flood hazard analysis in small catchments: Comparison of hydrological and hydrodynamic approaches by the use of direct rainfall[J]. Journal of Flood Risk Management, 2020,13(4):e12639.
- [13] Xu Y, Du J, Zhang L, et al. Research on system of flood disaster control and reduction supported by gis in medium and small basins[J]. Chinese Geographical Science, 2002,12(1):30-34.
- [14] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.黄土高原植被变化与恢复潜力预测[J].水土保持学报,2021,35(1):205-212.
- [15] 田小靖.黄土高原流域侵蚀产沙变化及其驱动因素[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [16] 焦俏,王飞,李锐,等.ERS 卫星反演数据在黄土高原近地表土壤水分中的应用研究[J].土壤学报,2014,51(6):1388-1397.
- [17] Han J, Ge W, Hei Z, et al. Agricultural land use and management weaken the soil erosion induced by extreme rainstorms[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020,301:107047.
- [18] 杜鹃,何飞,培军.湘江流域洪水灾害综合风险评价[J].自然灾害学报,2006,15(6):38-44.
- [19] Bouaida J, Witam O, Ibnoussina M, et al. Contribution of remote sensing and GIS to analysis of the risk of flooding in the Zat basin (High Atlas-Morocco)[J]. Natural Hazards, 2021,108(2):1835-1851.
- [20] 丁纪龙.渭河流域洪水灾害风险性研究[D].山东烟台:鲁东大学,2017.
- [21] 王建华.基于模糊综合评判法的洪水灾害风险评估[J].水利科技与经济,2009,15(4):338-340.
- [22] 李清秀.山东黄河段沿线区域洪灾风险评价与防洪措施[D].河南开封:河南大学,2012.
- [23] Zhu Z, Zhang Y. Flood disaster risk assessment based on random forest algorithm[J]. Neural Computing and Applications, 2022,34(5):3443-3455.
- [24] 党维勤,党恬敏,张泉,等.“7·26”暴雨调查对黄土高原水土保持工作的启示[J].中国水土保持,2021(3):24-27.
- [25] 程翌,章彩霞.安徽歙县“2020·7·7”暴雨洪水过程分析[J].中国防汛抗旱,2021,31(2):17-21.
- [26] 尚全民,褚明华,骆进军,等.2020 年长江流域性大洪水防御[J].人民长江,2020,51(12):15-20.