

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.022.

孙珑, 江曦, 韩剑桥, 等. 近 30 年来黄土高原山洪灾害风险时空变化及成因[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 241-247, 257.

Sun Long, Jiang Xi, Han Jianqiao, et al. Changes and Causes of Mountain Torrent Disaster Risk on the Loess Plateau in the Past 30 Years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 241-247, 257.

近 30 年来黄土高原山洪灾害风险时空变化及成因

孙 珑¹, 江 曦¹, 韩剑桥^{1,2}, 刘仪航¹

(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: [目的]揭示近 30 年黄土高原山洪灾害风险时空演变特征及其影响机制,为黄土高原山洪灾害宏观防控策略制定提供科学依据。[方法]基于降雨、植被覆盖、人口密度等数据建立山洪灾害风险评估体系,集成 GIS 和层次分析法(AHP)等方法,在绘制各驱动因子风险分布图的基础上,综合评估了黄土高原 1990 年和 2020 年的山洪灾害风险。[结果](1) 黄土高原山洪灾害高风险区主要集中在东部、南部和东南部地区,这些区域具有降雨强度大、人口密集、经济发达、耕地面积大等特点。(2) 1990—2020 年期间,黄土高原总体山洪灾害风险增加,表现为风险高的区域在原来的基础上向其四周拓展,其中山西省东南部、青海省西北部、内蒙古东北部最为明显。[结论]近 30 年来,增加的降雨强度、人口密度和 GDP 是山洪灾害风险增加的主要驱动因素,需要持续加强对极端降雨引发山洪灾害的防控。

关键词: 山洪灾害; 风险评估; 时空变化; 黄土高原

中图分类号: P954

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0241-07

Changes and Causes of Mountain Torrent Disaster Risk on the Loess Plateau in the Past 30 Years

Sun Long¹, Jiang Xi¹, Han Jianqiao^{1,2}, Liu Yihang¹

(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: [Objective] The aims of this study are to reveal the temporal and spatial evolution characteristics of mountain torrent disaster risk and its influencing mechanism on the Loess Plateau over the past 30 years, and to provide a scientific basis for the development of comprehensive prevention and control strategies for mountain torrent disasters on the Loess Plateau. [Methods] Based on the data of rainfall, vegetation cover, population density and so on, the risk assessment system of mountain torrent disaster was established. By integrating GIS and analytic hierarchy process (AHP), the mountain torrent disaster risks on the Loess Plateau in 1990 and 2020 were comprehensively evaluated based on the risk distribution map of each driving factor. [Results] (1) The high-risk areas were mainly distributed in the southwest, south and east of the Loess Plateau. These areas had the characteristics of high rainfall intensity, dense population, developed economy and large cultivated land area. (2) During the period from 1990 to 2020, the overall risks of mountain torrent disasters on the Loess Plateau increased, showing that the areas with high risk expanded to its surroundings on the original basis, among which the southeast of Shanxi Province, the northwest of Qinghai Province and the northeast of Inner Mongolia were the most obvious. [Conclusion] The increased rainfall intensity, population density and GDP are the main driving factors on the increase of mountain

收稿日期: 2023-05-29

修回日期: 2023-09-25

资助项目: 黄河水科学研究联合基金重点项目(U2243212); 国家自然科学基金(42177327); 中国科学院国际伙伴计划(16146KYSB20200001); 水利部重大科技项目(SKS-2022093)

第一作者: 孙珑(1999—), 女, 江西宜春人, 硕士研究生, 研究方向为流域洪水泥沙灾害。E-mail: sunlong@nwafu.edu.cn

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灾害研究。E-mail: hjq13@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

torrent disaster risks in the past 30 years. It is necessary to continuously strengthen the prevention and control of mountain torrent disasters caused by extreme rainfall.

Keywords: mountain torrent disaster; risk evaluation; temporal and spatial variation; Loess Plateau

山洪灾害在我国山丘区频发,影响范围广泛、造成损失惨重^[1]。据统计^[2-3],1949—2015 年全国发生山洪灾害事件共计 53 000 多次,累计死亡约 6 万人,直接经济损失累计高达 17.2 万亿元。黄土高原地区是我国典型的生态脆弱区,由于其特殊的地理条件及气候特点,夏季汛期山洪频发,极易遭受山洪灾害的侵扰^[4]。在 2020 年,极端天气事件频率和强度的增加,使黄土高原地区遭受了更频繁和更强烈的降雨和洪水^[5]。资料显示^[6-8],黄土高原近年来暴雨洪灾事件呈现出多发的趋势。因此,加强对该地区山洪灾害风险变化趋势及其驱动因素的研究,对于全面掌握区域洪灾状况和把控防治重点具有重要意义。

目前,众多学者针对黄土高原地区范围内的山洪灾害进行了深入研究,在评估方法、系统理论和防灾减灾等方面取得了一定的成果。在评估方法方面,随着 GIS 和水文模型的发展,对黄土高原地区山洪灾害风险评估的方法逐渐转变为以建立指标体系评价和水文水动力学模型模拟评价为主。例如,景珂星^[9]结合 SWAT 模型输出的水文参量和产流空间变化因子识别结果,建立了岔巴沟流域的山洪灾害风险评价指标体系,得到了该流域山洪灾害风险等级区划图。刘仪航等^[10]结合 GIS 和层次分析法等方法,综合评估了黄土高原不同地区的洪水灾害风险。赵海燕等^[11]采用 Flood Area 模型对屈产河流域典型强降雨过程引发的山洪灾害进行淹没模拟,结果表明流域内河道及上游山洪沟附近的山洪灾害危险性较高。李岷等^[12]基于 GIS 技术对山洪灾害影响因素进行分区并叠加分析,最终将宁夏地区划分为 16 个山洪灾害区 4 个风险等级。在系统理论方面,邹翔等^[13]基于陕西省山洪灾害调查结果,重点分析了山洪灾害的成因和分布规律,最终发现降雨是决定该地区山洪灾害形成和分布的最重要因素。在防灾减灾方面,何秋明^[14]从甘肃小流域分布特征的角度阐述了山洪的形成特点,判別了山洪易发区,并以“因地制洪”为原则提出了当地的防治策略。此外,陈晓萍^[15]、赵映东^[16]、魏冬青等^[17]结合研究区当地水文气象数据、沟道断面等要素数据及成灾特性等资料,提出了山洪灾害防治思路及对策。这些研究工作对黄土高原地区山洪灾害的风险评估具有重要意义。然而,目前的研究还存在一些问题和挑战。过去的研究主要集中在局部区域或单一时刻,缺少长时期大尺度的灾害综合评估,无法全面揭示黄

土高原地区山洪灾害风险的变化趋势和长期演化规律,不利于建立宏观的应对策略。

本文基于整个黄土高原区 1990 年和 2020 年的各项风险评估指标,通过层次分析法计算风险指标权重,运用 ArcGIS 的空间分析功能对山洪灾害危险性、承灾体的脆弱性和防灾应急能力进行分析确定山洪灾害的危险性和风险性区域分布图,评估黄土高原山洪灾害风险的空间分布特征,并判定近 30 年来山洪灾害风险变化趋势及其主导因素,进而为全面掌握黄土高原地区洪灾状况和把控防治重点提供关键科学依据。

1 研究区域

黄土高原(33°43′—41°16′N,100°54′—114°33′E)是世界上分布最集中且最广的黄土覆盖沉积区,横跨青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南七省(区),总面积约为 $6.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[18]。地区海拔空间差异较大(85~5 210 m),地势自西北向东南呈波状下降趋势^[19]。土地利用类型以草地、耕地为主,是中国西北重要的旱作农业区。自 20 世纪 50 年代开始,快速增长的人口和经济促进了不同程度的资源开采和工程建设,区域植被遭受了严重的破坏,生态环境进一步恶化。1990 年以后,黄河流域进入依法防治和全面生态建设与保护阶段^[20],多项水土保持法规、规划相继出台并实施,退耕还林还草、淤地坝系和坡改梯等工程的大力推进明显遏制了流域水土流失。因此,黄土高原的土地利用类型和生态状况也随之发生明显改变。

黄土高原属干旱大陆性季风气候区,年降水量为 150~820 mm,降水量总的趋势是由东南向西北、由山地向平原递减。降雨主要集中在 7—9 月,极端降雨较多^[21],汛期水量可以达到全年 70%以上。黄土高原地貌类型复杂多样、黄土土质疏松、人为开发力度大、植被覆盖少、夏季多暴雨,因而极易受到山洪灾害的侵扰。

2 数据与方法

2.1 研究方法

2.1.1 评价方法 目前评估大区域尺度自然灾害风险的主要方法是指标体系法。本研究首先根据山洪灾害的成因和影响因素,确定一系列评价指标;通过层次分析法(AHP)^[22-24]确定层次结构,建立判断矩阵,并计算判断矩阵的特征向量,以得到每个指标的

权重向量;对所需数据进行收集以及标准化、重采样、插值、重分类等一系列处理;根据指标权重和收集的数据,计算出各个评价指标的得分,并计算出黄土高原山洪灾害风险的评价结果。

山洪灾害的风险性由山洪灾害危险性、承灾体脆弱性和防灾应急能力共同决定。先将各因子栅格图按照自然间断点分级法(Jenks)重分类成 5 个等级,简化数据以便后续进一步的栅格计算。按照公式(1)和(2)对各因子图层进行栅格叠加计算,最终得到危险性和风险性的栅格分布图。

$$H=f(h)=\sum_{i=1}^n\omega_ih_i$$

(1)

表 1 风险等级划分说明

Table 1 Description of risk classification

风险指数	等级划分	灾害含义
<2.4	低	发生山洪灾害的可能性极低,即便发生降雨,其造成的损失也很小,几乎无影响
2.4~2.9	较低	发生山洪灾害的可能性较低,即使部分地区可能性较高也对山区居民点、公路、农田影响较小
2.9~3.3	中等	发生山洪灾害的可能性为中等,对山区居民点、公路、农田有一定影响
3.3~3.8	较高	发生山洪灾害的可能性较高,对山区居民点、公路、农田有较大影响
>3.8	高	发生山洪灾害的可能性高,一旦发生山洪灾害,极有可能造成人员伤亡、农田淹没、房屋公路损毁,造成严重的财产损失

2.1.2 指标选取 结合山洪灾害发生机理和黄土高原地区的山洪灾害调查评价成果,选取黄土高原山洪灾害的 11 个驱动因素。自然地理要素包括海拔、土壤、坡度、降雨、NDVI、耕地面积,降雨因子包括多年平均日最大降雨量、多年平均最长连续降雨天数两个指标。社会经济要素包括人口密度、地均 GDP、土地利用、医疗床位数。

自然地理要素以降雨为主导,降雨强度、降雨时长是山洪灾害主要致灾因素。短期的连续强降雨可以加速地表径流的形成,使山区河流水位上升,从而诱发山洪灾害;长历时强降雨一方面为山洪灾害提供了丰沛的水源,另一面对地表造成持续的强烈冲刷,极大地破坏地表完整性,为地表径流的形成提供地形条件。此外,海拔高程、坡度、土壤、土地利用等其他自然因素都会影响洪灾的发生和空间分布。

在社会经济方面,由于山洪灾害往往都会对人民生命财产安全造成严重威胁,所以人口密度是评估社会经济脆弱性的重要指标;地均 GDP 指标揭示区域暴露资产的绝对分布状况,指标数值越高,资产越容易遭受损失^[22];耕地不仅对降水的截留作用较差,而且容易被山洪淹没而产生经济损失,所以耕地面积越大的地区对山洪灾害的敏感性越高。医疗床位数是揭示山洪灾害发生后,研究区医疗救助能力的指标,指标数值越大,防灾应急能力越强^[25]。

$$R=f(H,V)=\omega_HH+\omega_VV$$

(2)

式中: H 为山洪灾害危险性指数; h 为危险性指标; h_i 为危险性因子; ω_i 为危险性因子对于危险性指数的权重系数; R 为山洪灾害风险性指数; V 为山洪灾害脆弱性指数和防灾应急能力指数; ω_H 为危险性指数对于风险性指数的权重系数; ω_V 为脆弱性指数和防灾应急能力指数对于风险性指数的权重系数。

根据山洪灾害的风险性指数将山洪灾害风险区划分为 5 个等级,风险程度由低到高依次表示为低风险区、较低风险区、中等风险区、较高风险区和高风险区。每个风险等级的数值范围及含义见表 1。

2.1.3 指标权重确定 AHP 法是一种系统、简便、灵活有效的决策方法。本研究采用 AHP 法对多标准的因素进行分析,对各个风险评价指标制定权重^[22]。本文的山洪灾害风险评价指标体系见表 2。

表 2 黄土高原山洪灾害风险区划各指标权重

Table 2 Weight of each index of mountain torrent disaster

risk zoning on Loess Plateau

目标层 A	准则层 B	因素层 C	B 层对 A 层的 相对权重	C 层对 B 层的 相对权重
黄土高原 山洪灾害 综合风险 性评价	危险性	海拔高程(C_1)	0.3	0.08
		坡度(C_2)		0.08
		土壤类型(C_3)		0.04
		土地利用类型(C_4)		0.22
		降雨强度(C_5)		0.22
		降雨时长(C_6)		0.22
		NDVI(C_7)		0.14
	脆弱性	人口密度(C_8)	0.6	0.5
		GDP(C_9)		0.3
		耕地面积(C_{10})		0.2
		防灾应急能力 医疗床位数(C_{11})		1

2.2 数据来源与处理

基础数据及其来源见表 3。为保证数据的一致性,所有栅格数据基于 GIS 平台校正处理后,利用重采样统一分辨率为 100 m×100 m。对于县级精度的社会经济数据和防灾应急能力指标数据,利用反距离

加权(Inverse Distance Weighting, IDW)插值法将每个县点数据进行空间插值成精度为 100×100 的栅格数据。数据处理及制图过程使用 Excel 以及 ArcGIS 中的 Spatial Analyst, Data Management 等工具。

表 3 基础数据
Table 3 Basic data

数据名称	数据内容	数据来源	备注
DEM	海拔、坡度	SRTM	30 m 精度
土壤数据	土壤分类	Global_Hydrologic_Soil_Group_1566 数据集	250 m 精度
土地利用	土地利用类型	LANDSAT 5 号、8 号卫星	30 m 精度
降雨数据	降雨强度、降雨时长	CHIRPS DAILY	选取 1981—1990 年和 1981—2020 年两个时段下的多年平均日最大降雨量、多年平均最长连续降雨天数进行数据合成,分辨率为 100 m
植被数据	NDVI(年最大合成)	LANDSAT 5 号、8 号卫星	100 m 精度
社会经济数据	人口密度、地均 GDP、单位耕地面积	1990 年和 2020 年各区县统计年鉴、人民政府官网	县级精度
防灾应急能力指标	医疗床位数	1990 年和 2020 年各区县统计年鉴、人民政府官网	县级精度

3 结果与分析

3.1 不同时期的灾害风险因子变化

3.1.1 危险性指标变化 如图 1 所示,黄土高原的降雨强度总体上由西北向东南递增。2020 年的降雨强度相比于 1990 年有所增加,且最高等级降雨强度的区域面积占比增幅最大,从 2.23%增加至 31.10%,增加区域主要分布在黄土高原东南部和中部地区的河南省、山西省和陕西省。1990 年与 2020 年的土地

利用类型变化较小,以草地和耕地为主,约占总面积的 60%。林地主要分布在东南部地区,西北部地区的建成区相对其他土地利用类型来说分布更为密集。黄土高原东南部地区植被覆盖状况比西北部地区更好。与 1990 年相比,黄土高原 2020 年的 NDVI 值总体上均有所增加,且最低等级 NDVI 值的区域面积占比增幅最大,从 18.53%增加至 47.74%,增加区域主要分布在中部和东南部地区,其他风险等级的 NDVI 面积占比均下降。

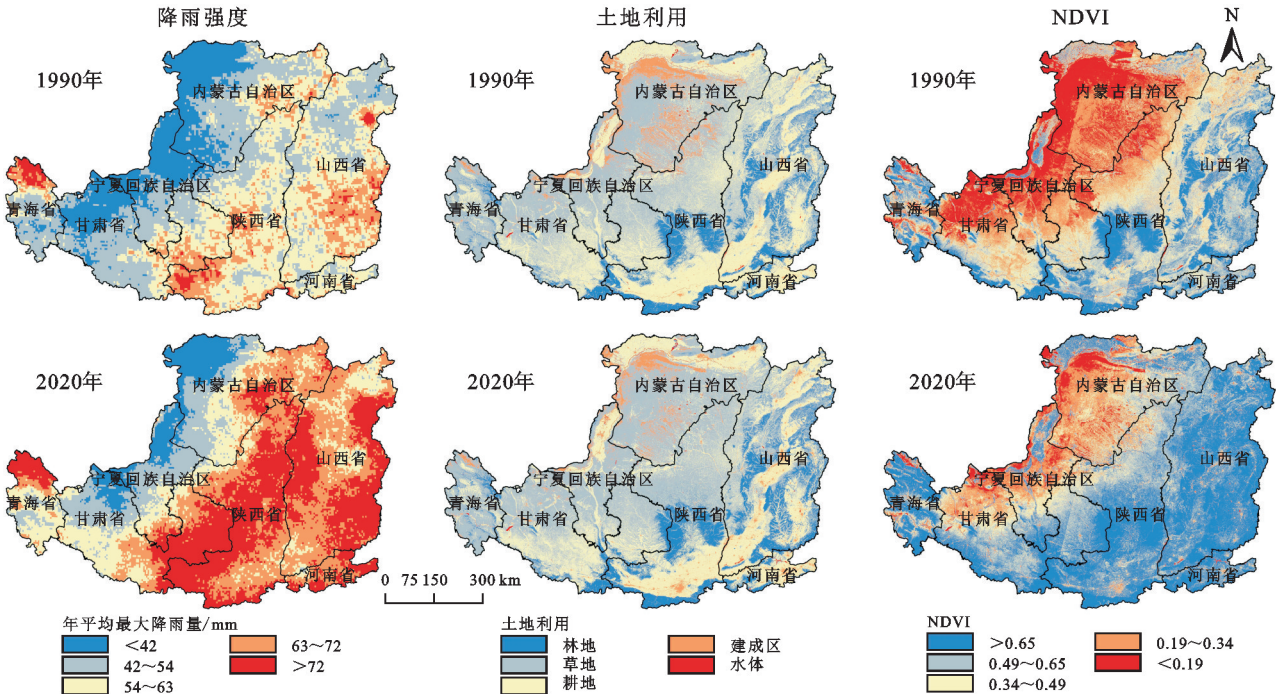


图 1 黄土高原山洪灾害危险性指标变化

Fig. 1 Changes of mountain torrent hazard indicators on the Loess Plateau

3.1.2 脆弱性与防灾能力指标变化 黄土高原地区的人口密度和 GDP 值均以各省(区)的省会为中心向

四周由高至低分布。1990—2020 年,随着社会经济的发展,整个黄土高原地区的人口密度和 GDP 均有所增加。相比于 1990 年,各省(区)2020 年的耕地面积均有所减少,但甘肃省东南部、山西省南部,以及河南省东部的耕地面积仍较大。相比于 1990 年,黄土高原 2020 年医疗床位数有所增加,全区的防灾应急能力得到提高。

3.2 黄土高原山洪灾害风险时空变化

3.2.1 危险性的时空变化 由图 2 可知,1990—

2020 年较高危险区和高危险区的面积占比均增加,分别由 17.34%,9.02%增加到 26.18%,12.87%。黄土高原的东部地区存在大面积由中等危险性升高至较高或高危险性的区域,南部和西南部地区的高危险性区域明显增加。内蒙古和宁夏以低危险性为主,且存在大面积区域由较低或中等危险性降低至低危险性。在空间尺度上,山洪灾害高危险区主要分布在黄土高原南部以及青海省北部,低危险区主要分布在黄土高原西北部。

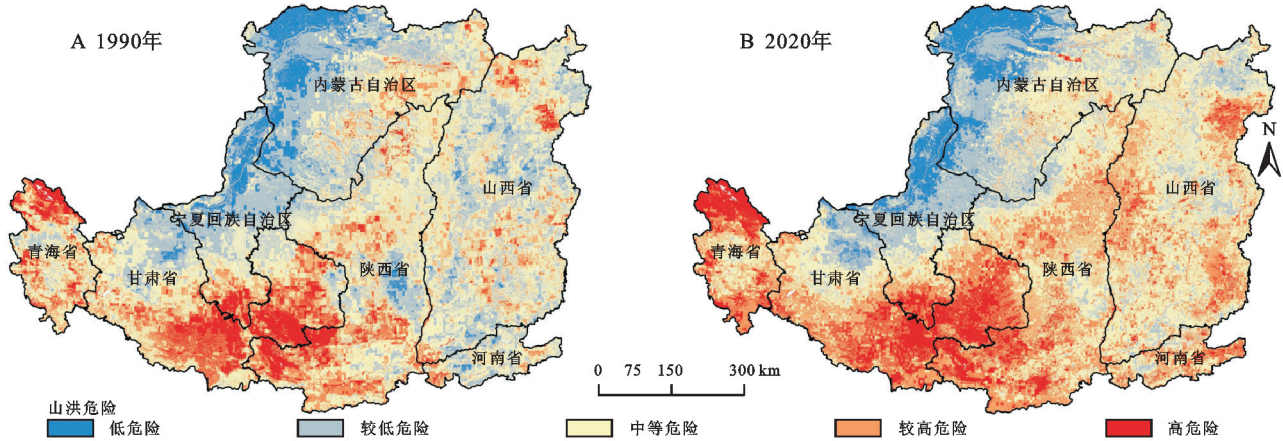


图 2 不同时期黄土高原山洪灾害危险性分布

Fig. 2 Distribution of mountain torrent hazard in different periods on the Loess Plateau

3.2.2 山洪灾害风险的时空变化 如图 3A—B 所示,黄土高原山洪灾害风险性整体表现为东南部高于西北部。除了宁夏外,黄土高原的东部、南部和东南部地区均存在大面积高风险区域。在时间尺度上,1990—2020 年黄土高原低风险区和较低风险区的面积占比减少了约 22%,其他风险等级的区域面积占

比均增加,尤其是较高风险区增加了约 10%,因此山洪灾害风险性整体呈增加趋势。

从图 3C 可以看出,全区仅 5.12%的区域风险等级降低,降低区域主要分布在黄土高原北部和东北部地区,52.42%的区域风险等级升高,42.46%的区域风险等级不变。

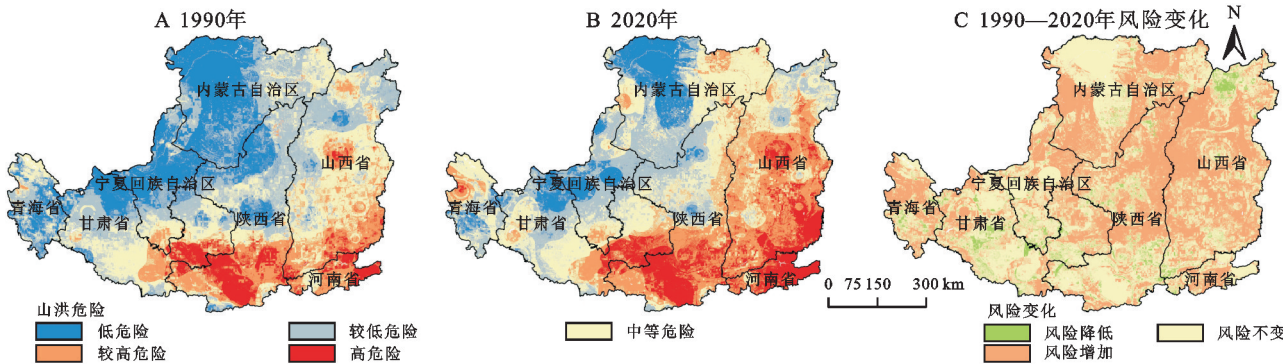


图 3 不同时期黄土高原山洪灾害风险性分布

Fig. 3 Distribution of mountain torrent risk in different periods on the Loess Plateau

4 讨论

山洪灾害危险性、承灾体脆弱性与防灾应急能力共同决定了山洪灾害风险性。本文结合 1990 年、2020 年山洪灾害风险性分布图以及该地区的已有研究,探究影响黄土高原山洪灾害风险变化成因。

由图 1 和图 3 可知,近 30 年来黄土高原大部分

区域的降雨强度均有所增强,尤其是中部和东南部地区,这与 1990 年和 2020 年的山洪灾害风险分布图相似。因此,本文考虑降雨强度作为影响山洪灾害风险性分布的主要因子。参考已有研究,刘业森等^[26]基于山洪灾害驱动力异质性分析,将全国山丘区划分为 11 个风险区进行山洪灾害风险评价,计算结果显示黄土高原风险区的降雨天数排全国第 8,但灾害强度

排第4,表明该地区降雨的致灾力相对于其他影响因素的致灾力更强,即降雨因子是黄土高原山洪灾害风险区空间分布变化的主要影响因素。因此,降雨在很大程度上决定了黄土高原地区山洪灾害危险性的空间分布特征,进而影响风险性的分布。黄土高原山洪灾害危险性和风险性的空间分布特征基本一致,均为由西北向东南方向递增,且南部高于北部,这与已有研究成果^[10]相似。

黄土高原是以农业生产为主的地区,除了草地外,土地利用类型以耕地为主。自黄土高原地区退耕还林还草等生态恢复措施^[27-28]实施以来,耕地大面积减少,植被覆盖度增加,一方面降低了承灾体的脆弱性,另一方面为减缓洪涝灾害的冲击起到了一定积极作用,即降低了危险性。

山洪灾害风险性与承灾体的脆弱性密切相关^[29],当山洪灾害来临时,脆弱性风险越高的地区,社会经济将遭受越严重的损失。黄土高原地区人口主要集中分布在各省的省会及其周边城市,随着经济发展,人口朝着省会城市的方向迁移,这种趋势导致脆弱性高风险区集中在省会,其范围逐渐向其周边地区扩大。GDP高值集中在人口密度大的区域,这些地区的资产易损性较高。近30年来,黄土高原的山洪灾害脆弱性总体上呈增加趋势。

山洪灾害在黄土高原地区频发,具有季节突发性强、暴发规模大、毁坏面广的特点,使得山洪灾害防御成为黄土高原地区防汛工作的难点和薄弱环节。本研究利用该地区的历史数据资料得出山洪灾害风险的空间分布特征及变化成因,有利于把控防治重点区域以及今后对风险较低的地区的预报预警工作。

5 结论

(1) 黄土高原山洪灾害危险性等级低和较低的区域主要分布在内蒙古和宁夏,其他地区的危险性主要表现为中等、较高和高危险性,等级高的区域主要分布在甘肃和青海。近年来,增强的降雨强度是山洪灾害危险性增加的主要原因。

(2) 山洪灾害风险性主要以各省(区)的省会为中心向四周由高至低分布,高风险区主要分布在山西,其次是陕西。除宁夏外,其他各省区的省会及其周边城市均存在大面积高风险区域。高风险地区具有降雨强度大、人口密集、经济发达、耕地面积大等特点。

(3) 1990—2020年,山洪灾害风险性整体上呈增加趋势,全区仅5.12%的区域风险降低,42.46%的区域风

险不变,52.42%的区域风险增加。降雨强度、植被覆盖、人口密度、GDP等指标是决定黄土高原地区山洪灾害风险程度的关键要素。因此,当地政府及相关部门应加强山洪灾害防范体系建设,提高当地灾害应对能力,尤其是在降雨集中的夏秋季应当密切关注当地水文情况,结合气象部门有针对性地开展防洪工作。

参考文献(References):

- [1] 魏永强,盛东,董林垚,等.山洪灾害防治研究现状及发展趋势[J].中国防汛抗旱,2022,32(7):30-35.
Wei Y Q, Sheng D, Dong L Y, et al. Review and development trend of flash flood disaster prevention and management[J]. China Flood & Drought Management, 2022,32(7):30-35.
- [2] 郭良,丁留谦,孙东亚,等.中国山洪灾害防御关键技术[J].水利学报,2018,49(9):1123-1136.
Guo L, Ding L Q, Sun D Y, et al. Key techniques of flash flood disaster prevention in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,49(9):1123-1136.
- [3] 刘楠漪,程维明,孙东亚,等.中国历史山洪灾害分布特征研究[J].地球信息科学学报,2017,19(12):1557-1566.
Liu Q Y, Cheng W M, Sun D Y, et al. Distribution characteristics of historical mountain flood in China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2017,19(12):1557-1566.
- [4] 魏艳红,焦菊英.黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式下小流域侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2021,35(3):96-103.
Wei Y H, Jiao J Y. Characteristics of erosion and sediment yield in small watersheds under different land use patterns in hilly and Gully Region of the Loess Plateau in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(3):96-103.
- [5] World Meteorological Organization. State of the Global Climate 2022[M]. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization, 2023.
- [6] 杨波,焦菊英,马晓武,等.2022年黄土高原典型暴雨侵蚀及洪水灾害调查分析[J].水土保持通报,2022,42(6):1-13.
Yang B, Jiao J Y, Ma X W, et al. Investigation and analysis of typical rainstorm erosion and flood disaster on Loess Plateau in 2022[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):1-13.
- [7] 刘荔昀,鲁瑞洁,丁之勇,等.黄土高原气候变化特征及原因分析[J].地球环境学报,2021,12(6):615-631.
Liu L Y, Lu R J, Ding Z Y, et al. Analysis of climate change characteristics and circulation factors in the Loess Plateau[J]. Journal of Earth Environment, 2021,12(6):615-631.
- [8] 蒋秀伟,师芸.黄土高原生态环境对气候变化与人类活

- 动的双重响应[J].测绘通报,2023(7):1-6.
- Jiang X W, Shi Y. Dual response of the Loess Plateau eco-system to climate change and human activities[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(7):1-6.
- [9] 景珂星.岔巴沟流域地表产流空间变化特征及山洪风险评估[D].西安:西北大学,2023.
- Jing K X. Spatial Variation Characteristics of Surface Runoff Generation and Flash Flood Risk Assessment in the Chabagou Watershed[D]. Xi'an: Northwest University, 2023.
- [10] 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 Y H, Han J Q, Xie M X, 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.
- [11] 赵海燕,范志宣,任玉欢,等.黄土高原山洪风险评估方法探讨:以屈产河流域为例[J].气候与环境研究,2022,27(1):147-156.
- Zhao H Y, Fan Z X, Ren Y H, et al. Flood risk assessment in the Loess Plateau: A case study of the quchan basin, China[J]. Climatic and Environmental Research, 2022,27(1):147-156.
- [12] 李岷,王国霞,田子荀.基于GIS技术的宁夏山洪灾害风险区划初探[J].中国水利,2017(7):38-41.
- Li M, Wang G X, Tian Z X. A preliminary study on regional division of flood disaster risks in Ningxia based on GIS technology[J]. China Water Resources, 2017(7):38-41.
- [13] 邹翔,任洪玉.陕西省山洪灾害成因与分布规律研究[J].长江科学院院报,2008,25(3):50-52,81.
- Zou X, Ren H Y. Reason and distribution law of torrent disaster in Shanxi Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008,25(3):50-52,81.
- [14] 何秋明.浅析甘肃小流域分布特性及山洪灾害成灾特点[J].地下水,2018,40(4):166-167.
- He Q M. Analysis on the distribution characteristics of small watersheds and the characteristics of mountain torrents in Gansu Province[J]. Ground Water, 2018,40(4):166-167.
- [15] 陈晓萍.青海东部黄土高原区山洪灾害特点及防治[J].青海师范大学学报:自然科学版,2011,27(3):73-75.
- Chen X P. Characteristics and controlling strategies of mountain torrential disasters of Loess Plateau in the eastern of Qinghai Province[J]. Journal of Qinghai Normal University: Natural Science Edition, 2011,27(3):73-75.
- [16] 赵映东.舟曲特大山洪泥石流灾害成因分析[J].水文,2012,32(1):88-91.
- Zhao Y D. Discussion on causes of Zhouqu great debris flow[J]. Journal of China Hydrology, 2012,32(1):88-91.
- [17] 魏冬青,赵映东.甘肃省暴雨洪水灾害特点及防治对策[J].中国水利,2016(12):15-16.
- Wei D Q, Zhao Y D. Characteristics of rainstorm and flood disaster in Gansu Province and its prevention countermeasures [J]. China Water Resources, 2016(12):15-16.
- [18] Sun J F, Li G D, Zhang Y, et al. Identification of priority areas for afforestation in the Loess Plateau region of China[J]. Ecological Indicators, 2022,140:108998.
- [19] 高海东,庞国伟,李占斌,等.黄土高原植被恢复潜力研究[J].地理学报,2017,72(5):863-874.
- Gao H D, Pang G W, Li Z B, et al. Evaluating the potential of vegetation restoration in the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(5):863-874.
- [20] 高云飞,张栋,赵帮元,等.1990—2019年黄河流域水土流失动态变化分析[J].中国水土保持,2020(10):64-67,7.
- Gao Y F, Zhang D, Zhao B Y, et al. Dynamic changes of soil and water loss in the Yellow River Basin from 1990 to 2019[J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(10):64-67,7.
- [21] Guan Y B, Yang S T, Zhao C S, et al. Monitoring long-term gully erosion and topographic thresholds in the marginal zone of the Chinese Loess Plateau[J]. Soil and Tillage Research, 2021,205:104800.
- [22] 张乾柱,王彤彤,卢阳,等.基于AHP-GIS的重庆市山洪灾害风险区划研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(1):91-102.
- Zhang Q Z, Wang T T, Lu Y, et al. Regionalization of torrential flood disasters in Chongqing based on AHP-GIS[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019,28(1):91-102.
- [23] 邓晓斌.基于ArcGIS两种空间插值方法的比较[J].地理空间信息,2008,6(6):85-87.
- Deng X B. Comparison between two space interpolation methods based on ArcGIS[J]. Geospatial Information, 2008,6(6):85-87.
- [24] Sonker I, Tripathi J N, Singh A K. Landslide susceptibility zonation using geospatial technique and analytical hierarchy process in Sikkim Himalaya[J]. Quaternary Science Advances, 2021,4:100039.
- [25] 叶翔宇,郭禹含,梁廖逢,等.川藏交通廊道暴雨山洪灾害风险评估[J].自然灾害学报,2023,32(4):48-60.
- Ye X Y, Guo Y H, Liang L F, et al. Risk assessment of mountain torrent disasters in Sichuan-Tibet traffic corridor [J]. Journal of Natural Disasters, 2023,32(4):48-60.

- 生态与农村环境学报, 2019, 35(9): 1111-1117.
- Wang Y, Zhou C W. Landscape ecological security pattern in central Guizhou urban agglomeration [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(9): 1111-1117.
- [22] 王志杰, 代磊. 黔中喀斯特山地城市土地利用/覆被变化及其生态效应评价: 以贵阳市花溪区为例 [J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3429-3440.
- Wang Z J, Dai L. Assessment of land use/cover changes and its ecological effect in Karst mountainous cities in central Guizhou Province: Taking Huaxi District of Guiyang City as a case [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3429-3440.
- [23] 周长威, 陈祁蔚. 黔中城市群生态旅游资源开发适宜性评价 [J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2022, 37(1): 109-117.
- Zhou C W, Chen Q W. Suitability evaluation of ecotourism resources development in central Guizhou urban agglomeration [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2022, 37(1): 109-117.
- [24] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [25] 孟斌, 王劲峰, 张文忠, 等. 基于空间分析方法的中国区域差异研究 [J]. 地理科学, 2005, 25(4): 393-400.
- Meng B, Wang J F, Zhang W Z, et al. Evaluation of regional disparity in China based on spatial analysis [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(4): 393-400.
- [26] 赵霖雨, 崔柳, 王佳, 等. 基于土地利用模拟预测模型分析的城市绿色空间发展多情景模拟及建设时序研究: 以湛江市中心城区为例 [J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6307-6320.
- Zhao J Y, Cui L, Wang J, et al. Multi-scenario simulation of urban green space development and construction Timeline based on PLUS model analysis: A case study of the central Zhanjiang City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6307-6320.
- [27] 丁星明, 朱诗渊. 赣州不同情景土地利用变化对生态系统服务价值影响 [J]. 北京测绘, 2023, 37(3): 415-419.
- Ding X M, Zhu S Y. Impact of land use change on ecosystem service value in different scenarios [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2023, 37(3): 415-419.
- [28] 陈万旭, 李江风, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析 [J]. 自然资源学报, 2019, 34(2): 325-337.
- Chen W X, Li J F, Zhu L J. Spatial heterogeneity and sensitivity analysis of ecosystem services value in the middle Yangtze River Region [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(2): 325-337.
- [29] 张晓瑶, 张潇, 李冬花, 等. 城市土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟: 以深圳市为例 [J]. 生态学报, 2022, 42(6): 2086-2097.
- Zhang X Y, Zhang X, Li D H, et al. Multi-scenario simulation of the impact of urban land use change on ecosystem service value in Shenzhen [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2086-2097.
- [30] 姜栋栋, 杨帆, 马伟波, 等. 大娄山区生态系统服务价值变化与情景预测 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(7): 1670-1680.
- Jiang D D, Yang F, Ma W B, et al. Evolution and scenario prediction of ecosystem service value in dalou mountain area [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(7): 1670-1680.

(上接第 247 页)

- [26] 刘业森, 杨振山, 黄耀欢, 等. 建国以来中国山洪灾害时空演变格局及驱动因素分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(2): 408-420.
- Liu Y S, Yang Z S, Huang Y H, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of China's flash flood disasters since 1949 [J]. Scientia Sinica: Terrae, 2019, 49(2): 408-420.
- [27] 王万忠, 焦菊英, 魏艳红, 等. 近半个世纪以来黄土高原侵蚀产沙的时空分异特征 [J]. 泥沙研究, 2015(2): 9-16.
- Wang W Z, Jiao J Y, Wei Y H, et al. Spatial-temporal differentiation characteristics of erosion sediment yield on the Loess Plateau during the recent half century [J]. Journal of Sediment Research, 2015(2): 9-16.
- [28] 牛丽楠, 邵全琴, 宁佳, 等. 黄土高原生态恢复程度及恢复潜力评估 [J]. 自然资源学报, 2023, 38(3): 779-794.
- Niu L N, Shao Q Q, Ning J, et al. Evaluation on the degree and potential of ecological restoration in Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(3): 779-794.
- [29] 任洪玉, 杜俊, 丁文峰, 等. 基于 GIS 的全国山洪灾害风险评估 [J]. 灾害学, 2018, 33(4): 86-92.
- Ren H Y, Du J, Ding W F, et al. Risk assessment of mountain torrents disaster in China based on GIS [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(4): 86-92.