

DOI: 10.12401/j.nwg.2023102

## 基于 1984~2022 年榆林市地质灾害记录 对其时空分布规律分析

刘锋<sup>1</sup>, 张茂省<sup>2,\*</sup>, 董英<sup>3</sup>, 丁维强<sup>4</sup>, 张勳<sup>2</sup>, 马俊<sup>1</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 712000;  
3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 4. 榆林市自然资源和规划局, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 地质灾害时空分布规律研究是制定地质灾害防治计划和落实防灾减灾措施的重要基础。笔者系统分析 1984~2022 年榆林市有记录的 527 组地质灾害数据, 总结榆林市地质灾害的时空分布规律。空间上, 榆林市地质灾害主要发生于清涧、子洲、米脂等县域, 在地貌上以黄土丘陵沟壑区为主, 黄河沿岸土石山区次之, 风沙滩地区不发育。在时间上, 年内地质灾害发生主要集中在 7~10 月汛期, 月内集中于 7 月 11~15 日, 冻融期均有分布且致死人数最多。灾害数量、致死人数越多, 其重现期越长。子洲县年地质灾害致死概率最高(16.5%), 其次为米脂县(9.8%)和府谷县(5.6%)。由此提出下一步工作建议: ①加强汛期降雨量与地质灾害发生概率定量关系研究, 完善地质灾害气象预警阈值。②加强冻融机理研究, 建立冻融型地质灾害防御方案。③加强“风险点+危险区”的双控机制研究。

**关键词:** 地质灾害; 时空分布规律; 重现期分析; 防灾减灾

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0204-10

### Analysis of Spatial and Temporal Distribution of Geological Disasters in Yulin City Based on the Records from 1984 to 2022

LIU Feng<sup>1</sup>, ZHANG Maosheng<sup>2,\*</sup>, DONG Ying<sup>3</sup>, DING Weiqiang<sup>4</sup>, ZHANG Xu<sup>2</sup>, MA Jun<sup>1</sup>

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 712000, Shaanxi, China; 3. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 4. Yulin Bureau of Natural Resources and Planning, Yulin 719000, Shaanxi, China)

**Abstract:** The study of the spatial and temporal distribution of geological disasters is an important basis for formulating geological disaster prevention plans and implementing disaster prevention and mitigation measures. This paper systematically analyzes 527 sets of geological disaster data recorded in Yulin City from 1984 to 2022. The spatial and temporal distribution rules of geological disasters in Yulin City has been summarized. Spatially, the geological disasters in Yulin City mainly occur in Qingjian, Zizhou, Mizhi Counties, and are mainly distributed in the earth-rock mountainous areas along the Yellow River and the loess hilly and gully areas. In

收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-03-17; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1504700), 国家自然科学基金重点项目(41641011)联合资助。

作者简介: 刘锋(1997-), 男, 博士研究生, 主要从事地质灾害防治、生态修复相关研究。E-mail: fengliu1102@foxmail.com。

\*通讯作者: 张茂省(1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 长期从事地质调查、灾害防治与生态修复研究工作。E-mail: xjtzms@xjtu.edu.cn。

terms of time, the number of geological disasters takes 5 years as a cycle, the flood season is frequent, concentrated on July 11~15, the freeze-thaw period is evenly distributed and the number of deaths is the largest. The more the number of disasters and deaths, the longer the return period. Zizhou County had the highest annual probability of death from geological disasters, 16.5%, followed by Mizhi County, 9.8%, and Fugu County, 5.6%. Therefore, the following suggestions are put forward: ① Strengthen the quantitative relationship between rainfall in flood season and the probability of geological disasters, and improve the meteorological warning threshold of geological disasters. ② Strengthen the study of freeze-thaw mechanism and establish a freeze-thaw geological disaster prevention plan. ③ Strengthen the research on the dual control mechanism of "risk point + risk area".

**Keywords:** geological disasters; spatial and temporal distribution; recurrence period analysis; disaster prevention and mitigation

地质灾害(如滑坡、崩塌、泥石流等)是地表岩土体发生位移而引发的灾害,通常由自然和人为因素协同诱发(Zezere et al., 1999; 张茂省等, 2011a, 2011b)。近年来,为保障国家能源资源安全,榆林市因资源开发及其配套设施建设,改变了原始地形地貌,扰动了土岩体,所引发的地质灾害造成人员伤亡的事件屡有发生(王雁林等, 2020)。例如,2003年9月23日,子洲县水地湾乡梁家沟村阳石畔自然村常崩则发生崩塌,致12人死亡;2007年10月12日绥德县马家川乡发生滑坡,9人被埋,其中4人死亡等。针对目前榆林市地质灾害频发、高发的现状与趋势,保障人民生命财产安全和区域经济协调发展对防灾减灾提出了更高的要求(张茂省等, 2014; 崔鹏等, 2018)。

地质灾害时空分布规律研究是制定地质灾害防治计划和落实防灾减灾措施的重要基础。目前,针对黄土地区地质灾害时空分布规律的研究成果主要集中在2个方面。①通过野外地质调查评价查明的地质灾害成灾及分布规律,该类成果精确度高、空间分布规律清晰、可应用性强。但经费需求较大、耗时相对较长,时间分布规律相对较难体现(张茂省, 2007; 白永健等, 2014; 刘文红, 2016; 孙萍萍等, 2022)。②通过3S技术(遥感RS、全球定位系统GPS和地理信息系统GIS)和多种分析方法(层次分析法、信息量法、人工神经网络、随机森林法等方法以及多种模型耦合)对区域地质灾害分布及易发性情况进行评价(樊芷吟等, 2018; 张林梵等, 2022; 何佳阳等, 2023)。此类方法的优点在于能有效减少野外工作量,控制成本,而研究结果受控于数据精度、方法选择以及人为误差等因素,还需跟进部署野外地质灾害核查以提高精确度(张茂省等, 2008)。地质灾害是时空关联性较

强的自然灾害,在过往灾点产生二次灾害的可能性较大。以上两类方法多是对现实调查数据和卫星遥感数据的分析总结,对地质灾害记录数据的考量稍显欠缺。同时,由于长时间序列地质灾害记录的缺失,基于统计数据的区域地质灾害时空分布规律研究相对较少。

随着黄河流域生态保护和高质量发展战略的推进,人类活动愈加强烈,地质灾害将成为影响人居环境和工业生产的重大隐患(彭建兵等, 2020)。因此,笔者系统分析1984~2022年榆林市地质灾害记录资料,总结地质灾害时空分布规律,对地质灾害发生数量的重现期及地质灾害年致死概率进行计算分析。研究成果可为榆林市地质灾害防灾减灾工作的开展提供基础数据和科学支撑。

## 1 榆林市地质灾害发生总体情况

### 1.1 数据来源

根据陕西省地质环境监测总站《2001~2022年地质灾害灾情报告表》和榆林市自然资源和规划局《1984~2022年地质灾害灾情统计表》等相关数据,综合对比得出,除2003年7月21日绥德县的滑坡和2003年9月23日子洲县的崩塌以外,相关数据高度吻合,有效数据共计527组。

### 1.2 基本情况

据有明确时间和地点记录的数据统计,1984~2022年共发生地质灾害527起,其中滑坡和崩塌506起,致人死亡的灾害有82起,共计死亡274人;泥石流及其他灾害(地裂缝、地面塌陷等)21起,未造成人员死亡。文中对地质灾害的论述造成死亡的滑坡和崩塌为主。总体上榆林市每年平均发生滑坡、崩塌

数量为13起,每年造成7人死亡,平均每发生2起灾害就会导致1人死亡。其中,1984~2002年共发生滑坡和崩塌180起,平均10起/a,共计死亡166人,平均为9人/a。2003~2022年间共计发生滑坡和崩塌326起,平均为16起/a;致人死亡的灾害有29起,共计死亡110人,平均为5人/a。

## 2 空间分布规律

### 2.1 县域空间分布

在县域空间分布上,1984~2022年滑坡、崩塌灾害在全市各区县均有发生(表1)。其中,清涧县最多,为163处;子洲58处、府谷58处、米脂55处次之;榆阳17处、横山17处、吴堡16处、靖边14处、佳县11

处最少(图1)。在类型上,以崩塌为主(326处),滑坡次之(180处),泥石流及其他灾害发生较少(21处)。

### 2.2 地貌空间分布

地貌是地质结构和地质营力共同作用形成的,不同地貌中地质灾害发生的次数有较大差异(熊德清等, 2021)。榆林市总体地势西高东低,地貌类型主要分为3类:黄河沿岸土石山区、黄土丘陵沟壑区和风沙滩地区(张茂省等, 2014)。地质灾害在黄河沿岸土石山区分布264处,黄土丘陵沟壑区213处,而风沙滩地区仅有50处(图2)。其中,黄河沿岸土石山区的地质灾害集中于东北部府谷县和东南部的清涧县,在各河流沟谷也有零星分布;黄土丘陵沟壑区地质灾害集中于东南部的绥德、米脂、子洲等县域;风沙滩地区地质灾害沿与黄土丘陵沟壑区的交界处分布。

表1 榆林市各区县滑坡崩塌数量表

Tab. 1 Number of landslide collapses in Yulin city

县区	类 型											
	榆阳	神木	府谷	定边	靖边	横山	绥德	米脂	佳县	吴堡	清涧	子洲
发生数(次)	6	11	43	26	6	8	38	29	8	7	110	34
崩塌 致死灾害数(次)	1	0	3	4	2	4	5	10	2	1	2	11
死亡人数(人)	2	0	28	11	6	6	13	20	4	2	3	63
发生数(次)	11	11	15	4	8	9	7	26	3	9	53	24
滑坡 致死灾害数(次)	4	0	0	1	1	4	5	12	0	4	2	4
死亡人数(人)	26	0	0	2	1	10	16	31	0	10	13	7

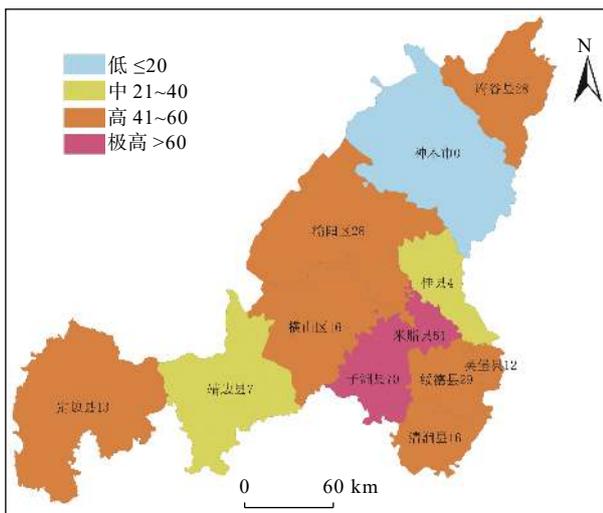


图1 榆林市地质灾害等级分布图

Fig. 1 Distribution of Geological Hazard Levels in Yulin City

地质结构是地质灾害发育的基础。黄河沿岸土石山区海拔约为724~1161m,相对高差较大,是各级

支流与黄河汇合的带状区域。沿河两岸地形狭窄,薄层黄土覆盖于裸露基岩之上,极端或连续降雨时水分进入岩石空隙中,增加岩体自重应力,常形成崩塌灾害(张卜平等, 2021)。例如,砒砂岩的大面积覆盖及其胶结程度差、遇水后强度大幅下降的特性,导致府谷县崩塌灾害发育(伍艳等, 2019)。厚层风积黄土构成了黄土丘陵沟壑区的表层,其水敏性强、垂直节理发育、遇水后强度降低的特性,是地质灾害频发的主要因素(冷艳秋, 2018; 孙萍萍等, 2019)。风沙滩地区高差较小,相对平坦,黄土梁崩受到侵蚀后形成其基底,可移动的风成沙丘和零散分布的滩地构成其表面。因此地质灾害不发育。

地质营力和人类活动促进地质灾害的形成和诱发(张茂省等, 2011a, 2011b)。黄河沿岸土石山区水系发育,在水流侵蚀作用下,垂向下切强烈,风化、卸荷裂隙的存在加剧崩塌灾害的发生。同时,沿黄公路的

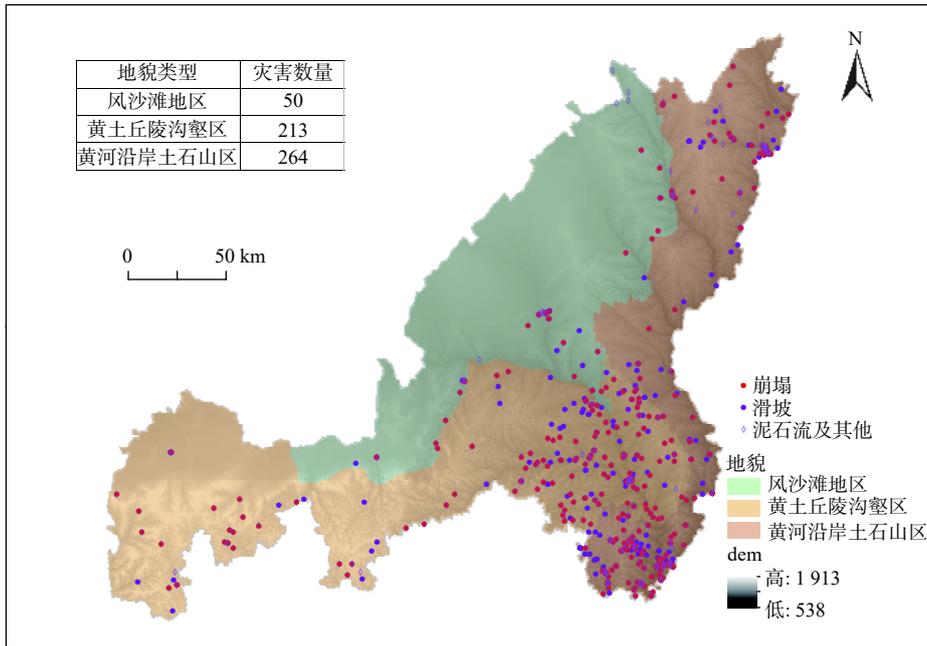


图 2 榆林地区滑坡崩塌泥石流灾害分布图

Fig. 2 Distribution of landslide, collapse and debris flow disasters in Yulin area

修筑和城镇区域的外扩都在不同程度上影响了周边坡体的稳定性, 也导致黄河沿岸土石山区地质灾害频发(彭建兵等, 2016)。而对于地形破碎的黄土丘陵沟壑区, 在以流水为主的外动力作用, 以及降雨、切坡等诱发因素下, 斜坡表面黄土水土流失严重。坡体内水分增加、吸应力降低, 形成以贯通裂隙或湿润面为主的软弱结构面, 是发育较多地质灾害的重要原因(Feng et al., 2021)。同时, 而风沙滩地区由沙丘沙地和滩地组成, 颗粒松散, 地形起伏较小, 发生地质灾害较少, 危害性也较小。

### 2.3 致死地质灾害空间分布

1984~2022 年榆林市滑坡崩塌灾害共计致死 274 人(表 1), 平均 2 起滑坡崩塌就会致 1 人死亡。其中崩塌致人死亡数为 158 人, 占总人数的 57.66%; 滑坡造成的死亡数为 116 人, 占比 42.34%, 少于崩塌致人死亡数。在空间分布上, 东南部致人死亡的灾害相对较多(图 3)。其中, 子洲县发生滑坡崩塌灾害 58 起, 致人死亡的灾害数为 15 起, 死亡人数高达 70 人, 平均 1 起灾害导致 1 人死亡; 米脂县发生滑坡崩塌共 55 起, 致人死亡的灾害数为 22 起, 造成 51 人死亡, 平均 1 起灾害造成 1 人死亡; 清涧县发生滑坡崩塌 163 起, 致人死亡的灾害数为 4 起, 死亡 16 人, 平均为 10 起滑坡崩塌导致 1 人死亡; 神木市尚无致人死亡的记录(图 4)。

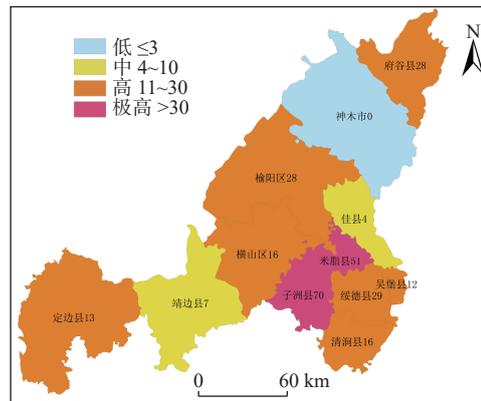


图 3 地质灾害致死人数等级分布图

Fig. 3 Grade distribution of death toll of geological disasters

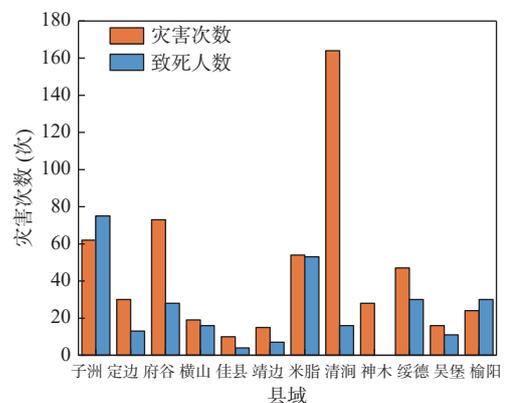


图 4 地质灾害数量及死亡人数分布图

Fig. 4 The number of geological disasters and the distribution of deaths

### 3 时间分布规律

#### 3.1 时间分布

(1)年际分布规律:采用时间序列分析方法中常用的滑动平均法,分析近40年来榆林市地质灾害的周期性特征。总体上,榆林市发生地质灾害数量没有明显的周期性(图5)。纵观1983~2022年的地质灾害记录数据,发生地质灾害数量最多的年份在2013年,发生数量达162次;其次为2017年,发生47次;以及2003年和2020年,发生25次。

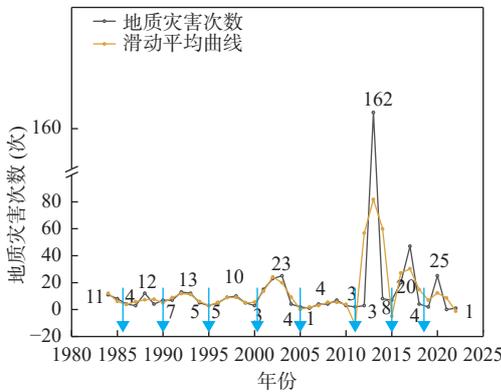


图5 地质灾害数量年际变化图

Fig. 5 Annual variation of the number of geological disasters

(2)年内分布规律:榆林市地质灾害全年均有发生,主要集中于汛期7~9月,共发生地质灾害346起(图6)。其中,汛期内7月最多,共190起;8月共发生119起。这与榆林市年内降水主要集中在7~9月有关。

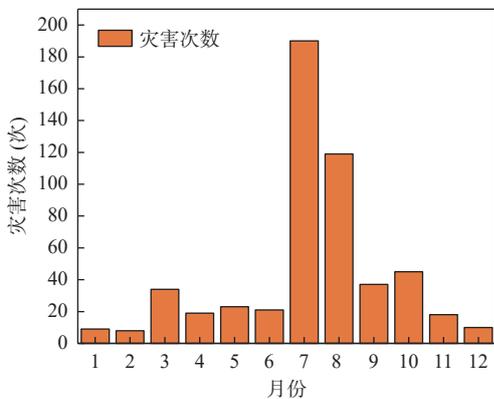


图6 地质灾害数量年内统计图

Fig. 6 Annual statistics of the number of geological disasters

(3)汛期分布规律:以7月和8月单日灾害数作为样本进行逐日分析,滑坡崩塌发生集中于每年的7月12日和7月13日(图7)。以5天内灾害数统计,7月11~15日地质灾害发生最多,类型以崩塌为主(图8)。

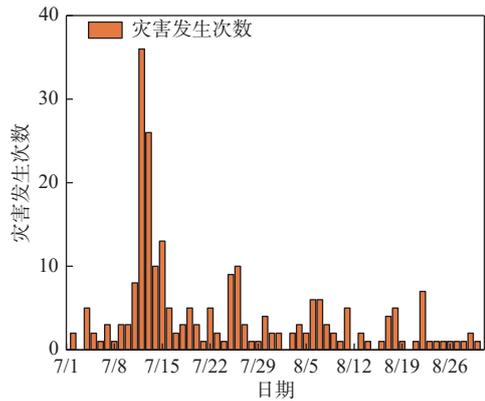


图7 汛期单日地质灾害数量统计图

Fig. 7 Statistics of single-day geological disasters in flood season

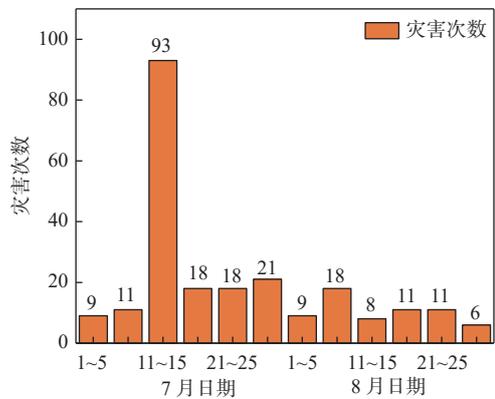


图8 汛期5日滑地质灾害数量统计图

Fig. 8 Statistics of 5-day sliding geological disasters in flood season

(4)冻融期分布规律:地质灾害在3月相对集中,且全月均有发生(图9)。近40年来3月累计发生地质灾害30起,平均每天发生1起。通过对数据的5日灾害数量分析,除21~25日外,其他时间灾害发生较为平均,说明冻融作用在3月所造成的影响较为连续。

#### 3.2 致死地质灾害时间分布

总体分布规律:近40年来,榆林市地质灾害平均每年导致7人死亡,总体上死亡人数呈现减少的趋势。其中,1984~2002年地质灾害共计导致死亡166人,

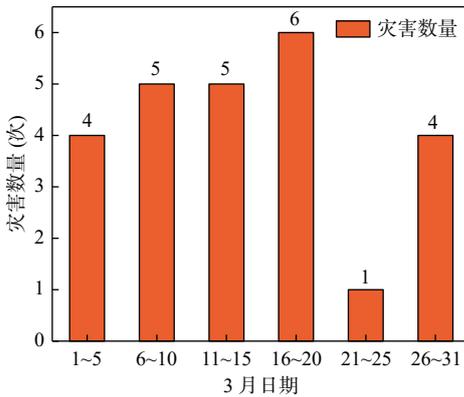


图9 冻融期滑坡崩塌灾害发生次数直方图

Fig. 9 The number of landslide collapse disasters in freeze-thaw period

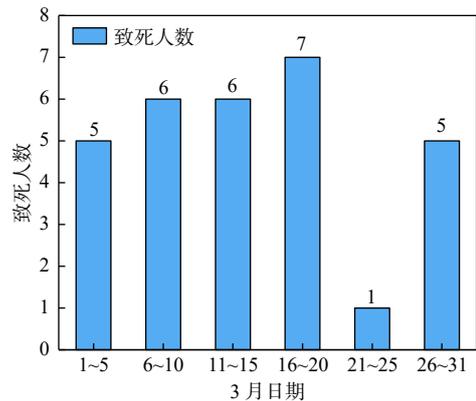


图11 3月份地质灾害死亡人数分布图

Fig. 11 Distribution of death toll of geological disasters in March

平均为9.2人/a; 2003~2022年发生致人死亡的地质灾害有29起, 共计死亡110人, 平均为5人/a。随着极端气候和人类活动增强, 近20年地质灾害发生数量较20年前明显增多, 但随着地质灾害防治管理加强和群众防灾减灾意识增强, 造成的人员伤亡明显下降。

年内规律, 除12月份外, 每个月都有致人死亡的地质灾害记录(图10), 主要集中在3月, 其次是9、10、11月; 7月共发生地质灾害112起, 致人死亡的只有2起, 造成2人死亡; 8月共发生地质灾害61起, 4起灾害致人死亡, 造成9人死亡。值得说明的是, 7、8月份发生滑坡、崩塌数量最多, 但造成的死亡人数并不多, 当与重视汛期地质灾害防御有关。

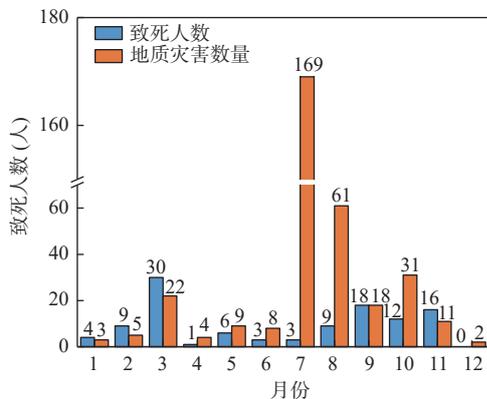


图10 全年地质灾害发生数量与死亡人数对比图

Fig. 10 Comparison of annual number of geological disasters and deaths

月内规律, 3月份死亡人数除21~25号较低外, 其他时段均高发(图11)。3月份发生滑坡、崩塌与冻

融作用有关, 造成的死亡人数最多, 应加强冻融期地质灾害防治管理和防御措施研究。

## 4 地质灾害重现期与致死概率

### 4.1 地质灾害重现期分析

重现期是指在一定年代的雨量记录资料统计期间内, 大于或等于某暴雨强度的降雨出现一次的平均间隔时间, 为该暴雨发生频率的倒数(林两位等, 2005)。

$$T = \frac{1}{P} = \frac{n+1}{m} \quad (1)$$

式中:  $T$ 为重现期,  $P$ 为经验频率,  $n$ 为样本总数,  $m$ 额某一次数的排序。

地质灾害重现期表征在一段时期的地质灾害统计资料中, 每年地质灾害发生次数大于或等于某个数量的间隔时间, 其倒数即为经验频率。根据榆林市地质灾害统计数据, 可以计算出每年地质灾害发生的频次。根据重现期的累积分布函数计算(表2), 1984~2022年榆林市每年滑坡崩塌发生次数最少为0次(2021年, 府谷某煤矿、子洲某采气厂2起崩塌按安全事故处理, 严格意义上讲, 每年都滑坡、崩塌有发生), 最多为162次(2013年), 求得每年发生 $\geq 5$ 次的经验频率为52.5%, 发生 $\geq 162$ 次灾害的频率为2.5%, 其重现期为40年。

通过对致死灾害的数量分析(表2), 每年的致死灾害数量最少为0次(2000、2005、2006、2011、2015、2018、2021、2022年), 占比4.08%,  $\geq 0$ 次的经验频率为88.75%; 最多发生有6次致人死亡的灾害(1988、

表2 年地质灾害发生频率、年致死地质灾害发生频率、年致死人数发生频率及其重现期表

Tab. 2 The frequency and return period of annual geological disasters, annual fatal geological disasters and annual fatalities

灾害发生数(次)	经验频率(%)	重现期(a)	致死灾害数(次)	致死灾害所占比例(%)	经验频率(%)	重现期(a)	致死人数(人)	经验频率(%)	重现期(a)
0	97.5	1	0	4.08	88.75	1	0	88.75	1
1	93.75	1	1	49.39	66.25	2	1	76.25	1
2	87.5	1	2	10.82	46.25	2	2	68.75	1
3	77.5	1	3	9.39	28.75	3	3	58.75	2
4	63.75	2	4	11.02	16.25	6	5	52.5	2
5	52.5	2	5	7.76	10	10	6	48.75	2
7	43.75	2	6	7.55	3.75	27	7	36.25	3
8	36.25	3					8	25	4
9	32.5	3					9	22.5	4
10	30	3					10	20	5
11	27.5	4					12	16.25	6
12	23.75	4					13	12.5	8
13	20	5					15	10	10
15	17.5	6					22	7.5	13
20	15	7					28	5	20
23	12.5	8					35	2.5	40
25	8.75	11							
47	5	20							
162	2.5	40							

2003年), 占比 7.55%,  $\geq 6$  次的经验频率为 3.75%, 其重现期为 27 年; 致死灾害数为 1 次的占比最高, 达 49.39%,  $\geq 1$  次的经验频率为 66.25%。

通过对致死人数的经验频率计算(表 2), 致死人数最多的年份为 1985 年, 达 35 人, 死亡人数  $\geq 35$  人的经验频率为 2.5%, 重现期为 40 a; 其次为 2010 年的 28 人和 2003 年的 22 人,  $\geq 28$  人和  $\geq 22$  人的经验频率分别为 5% 和 7.5%; 致死人数  $\geq 5$  人的经验频率为 52.5%; 一年中有因地质灾害死亡的频率为 88.75%。

#### 4.2 年地质灾害致死概率

人员年地质灾害致死概率( $P_{(DOG)}$ )指某一区域的

居民每年因地质灾害而死亡的概率。其以地质灾害历史数据为依据, 由各区(县)年地质灾害发生概率( $P_L$ )和地质灾害人员死亡分布概率( $V$ )为参数计算得出, 其计算公式为:

$$P_{(DOG)} = P_L \times V \quad (2)$$

计算得到各区(县)的人员年地质灾害死亡概率(表 3)。

从表中可知, 由于榆林市各区(县)地质灾害发生概率和造成的人员死亡分布不均, 导致各区(县)人员年地质灾害死亡概率出现显著差异, 而这种差异性则与前述致死地质灾害空间分布规律(图 3)一致。子洲、

表3 各区县人员年地质灾害致死概率表

Tab. 3 The annual death probability of geological disasters in each county

参数	县 区											
	林阳	神木	府谷	定边	靖边	横山	绥德	米脂	佳县	吴堡	清涧	子洲
$V$	0.100	0.000	0.100	0.047	0.025	0.057	0.104	0.183	0.014	0.043	0.057	0.269
$P_L$	0.385	0.231	0.564	0.282	0.231	0.308	0.385	0.538	0.154	0.359	0.231	0.615
$P_{LoL}(\%)$	3.860	0.000	5.661	1.314	0.579	1.765	3.998	9.843	0.221	1.544	1.323	16.543

米脂不仅是地质灾害的高发区,也是地质灾害造成人员死亡的重灾区,这与其大面积覆盖黄土、沟谷高差较大、水系较为发育有关。而府谷和榆阳年地质灾害致死概率高,除了与地质因素有关以外,采煤、修路等人类工程活动仍是重要因素。

## 5 讨论

从历史记录来分析地质灾害时空分布规律,是基于统计学原理对地质灾害发展趋势进行总结。从研究结果可以看出,地质灾害的分布与地形地貌、降雨情况、冻融循环存在密切联系。而地质灾害导致人员伤亡的概率,除自然因素外,还受当地防灾减灾政策和人民地质灾害防患意识的影响。因此,要建立完善的榆林市地质灾害的风险防控体系,应聚焦于孕灾环境、致灾因素和减小危害3个方面,可概化为以下3个关键问题:

(1)加强汛期降雨量与地质灾害发生概率的定量关系研究,完善地质灾害气象预警阈值。其关键在于建立汛期降雨量和地质灾害发生概率之间关系的数学模型,除降雨强度外,该模型还应考虑降雨时间、地质条件、地形地貌等多种因素。在此基础上,搜集大量的实测数据和历史灾害数据,包括记录灾害发生时间、灾前降雨情况等,可以建立以汛期降雨量为特征值的地质灾害气象预警系统。已有研究证明岩土体强度特性在不同的水力路径下会发生较大改变(马田田等,2012),即部分斜坡在单次降雨后可能不会发生失稳,但多次降雨后则会出现较大的失稳可能。那么考虑灾害发生前的有效降雨量,则会较大提高灾害预警的精度(李守定等,2021)。遗憾的是,除部分特别设计的地质灾害调查记录表,大部分调查表并未考虑灾害发生的具体时间和灾前降雨情况。然而,笔者搜集到地质灾害与降雨情况的精确时空资料有限,未能分析地质灾害与降雨过程的相关性。在今后的工作中,应系统搜集灾前降雨数据、预警信息和地质灾害数据,从而建立更精确的数学模型,以完善地质灾害气象预警系统。

(2)加强冻融机理研究,建立冻融型地质灾害防御方案。陕北地区冬季昼夜温差大,春季冻融作用强烈,是导致冻融期崩塌地质灾害发育的重要因素(王潇,2014)。要防御冻融型地质灾害,首先需要研究冻融作用对岩土体的破坏机理。已有研究表明,岩体受

反复冻融作用影响,裂隙岩体会产生局部化损伤效应,进而诱发端部断裂造成岩体整体失稳(申艳军等,2017)。而冻融作用主要影响岩体内水分的固-液转化过程,因此亟需加强岩体中水分-温度-损伤耦合模型研究。该模型建立的难点在于岩体内部水分相态难以确定、内外热传导规律研究不明、损伤效应有待进一步量化,需要以热力学定律为纽带,进行大量试验以研究规律。在该模型的基础上,通过总结历史冻融期灾害记录,从而建立基于温度指标的冻融型地质灾害防御方案。

(3)加强“风险点+危险区”的双控机制研究。地质灾害防治工作除了对隐患点的排危除险或工程治理外,从管理角度出发,以风险为依据,在规划源头防控地质灾害是可供参考的。例如,2020年杭州市临安区开展地质灾害风险隐患“双控”试点工作并取得了实效。立足陕北地区地形地貌复杂、地质灾害频发的特点,地质灾害隐患管理已无法满足当前的防灾减灾需求,亟需推进防控方式由“隐患点防控”向“风险点+危险区”双控转变。虽然部分重点地区开展了地质灾害危险性评价,但少有进一步挖掘成果的可应用性。以地质灾害危险性评价为基础,补充风险调查,包括灾害发生概率、影响范围、承载体、时空概率、易损性调查等,可以划定危险区划(张茂省等,2008)。利用国土空间规划管控、用途管制等非工程性手段,构建完善“隐患点+危险区”双控管理制度,严格控制地质灾害危险区内工程活动,可以从源头减小地质灾害造成的危害。

## 6 结论

(1)榆林市1984~2022年每年都有发生地质灾害,共513起,造成274人死亡,平均每2起地质灾害致1人死亡。在县域上,清涧、子洲、米脂、府谷等县地质灾害发生较多;子洲、米脂等县造成的伤亡人数最多。在地貌上,地质灾害主要分布在黄河沿岸土石山区和黄土丘陵沟壑区。

(2)榆林市每年都会发生地质灾害;全年均有发生,主要集中于汛期7~9月;滑坡崩塌发生集中于每年的7月11~15日;死亡人数除3月21~25日号较低外,其他时段均高发。

(3)每年发生5次地质灾害的经验频率是50%,发生2次致死地质灾害的经验频率为46%,致死人数

为6人的经验频率为48.75%，重现期都为2a。灾害数、致死灾害数和人数越多，其重现期越长。计算得出年地质灾害致死概率以子洲县最高(16.5%)，其次为米脂县(9.8%)、府谷县(5.6%)。

(4)结合榆林市地质灾害分布特点和防灾减灾政策，提高地质灾害防治能力，未来仍需加强以下3个方面的研究：①加强汛期降雨量与地质灾害发生概率定量关系研究，建立更加精确的、以降雨阈值为依据的气象预警体系。②加强冻融机理研究，建立冻融型地质灾害防御方案。③加强“风险点+危险区”的双控机制研究。

## 参考文献(References):

- 白永健, 铁永波, 倪化勇, 等. 鲜水河流域地质灾害时空分布规律及孕灾环境研究[J]. *灾害学*, 2014, 29(4): 69-75.
- BAI Yongjian, TIE Yongbo, NI Huayong, et al. Temporal-Spatial Distribution and Environment Pregnant of Geohazards in Xi'an Shui River of Sichuan, China[J]. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(4): 69-75.
- 崔鹏, 胡凯衡, 陈华勇, 等. 丝绸之路经济带自然灾害与重大工程风险[J]. *科学通报*, 2018, 63(11): 989-997.
- CUI Peng, HU Kaiheng, CHEN Huayong, et al. Risks along the Silk Road Economic Belt owing to natural hazards and construction of major projects[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(11): 989-997.
- 樊芷吟, 苟晓峰, 秦明月, 等. 基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(02): 340-347.
- FAN Zhiyin, GOU Xiaofeng, QIN Mingyue, et al. Information and Logistic Regression Models Based Coupling Analysis for Susceptibility of Geological Hazards[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(02): 340-347.
- 何佳阳, 巨能攀, 解明礼, 等. 高山峡谷地区地质灾害隐患 InSAR 识别技术对比[J/OL]. *地球科学*, 2023: 1-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220829.1632.004.html>.
- HE Jiayang, JU Nengpan, JIE Mingli, et al. Comparison of InSAR Technology for Identification of Hidden Dangers of Geological Hazards in Alpine and Canyon Areas[J]. *Earth Science*, 2023: 1-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220829.1632.004.html>.
- 冷艳秋. 黄土水敏特性及其灾变机制研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- LENG Yanqiu. Research on water sensitivity characteristics and disaster mechanism of loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- 李守定, 乔华, 马世伟, 等. 基于温度-降雨双参数的新疆地质灾害预警模型[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(11): 207-218.
- LI Shouding, QIAO Hua, MA Shiwei, et al. Temperature-rainfall dual parameter-based early warning model for geological disasters in Xinjiang[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(11): 207-218.
- 林两位, 王莉萍. 用 Pearson-III 概率分布推算重现期年最大日雨量[J]. *气象科技*, 2005, (04): 314-317.
- LIN Liangwei, WANG Liping. Estimation of Annual Maximum Diurnal Precipitation for Reappearance Periods with Pearson-III Distribution[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2005, (04): 314-317.
- 刘文红. 黄土高原滑坡发育背景与成灾模式研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- LIU Wenhong. Study on the development background and disaster model of landslide in the Loess Plateau[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- 马田田, 韦昌富, 陈盼, 等. 非饱和土毛细滞回与变形耦合弹塑性本构模型[J]. *岩土力学*, 2012, 33(11): 3263-3270.
- MA Tiantian, WEI Changfu, CHEN Pan, et al. An elastoplastic constitutive model of unsaturated soils with capillary hysteresis and deformation coupling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(11): 3263-3270.
- 彭建兵, 吴迪, 段钊, 等. 典型人类工程活动诱发黄土滑坡灾害特征与致灾机理[J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(05): 971-980.
- PENG Jianbing, WU Di, DUAN Zhao, et al. Disaster Characteristics and Destructive Mechanism of Typical Loess Landslide Cases Triggered by Human Engineering Activities[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(05): 971-980.
- 彭建兵, 王启耀, 庄建琦, 等. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制[J]. *地质力学学报*, 2020, 26(05): 714-730.
- PENG Jianbing, WANG Qiyao, ZHUANG Jianqi, et al. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(05): 714-730.
- 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 冻融循环作用下单裂隙类砂岩局部化损伤效应及端部断裂特性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(03): 562-570.
- SHEN Yanjun, YANG Gengshe, RONG Tenglong, et al. Localized damage effects of quasi-sandstone with single fracture and fracture behaviors of joint end under cyclic freezing and thawing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(03): 562-570.
- 孙萍萍, 张茂省, 冯立, 等. 黄土水敏性及其时空分布规律[J]. *西北地质*, 2019, 52(02): 117-124.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Water Sensitivity of Loess and Its Spatial-Temporal Distribution on the Loess

- Plateau[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(02): 117-124.
- 孙萍萍, 张茂省, 贾俊等. 中国西部黄土区地质灾害调查研究进展[J]. *西北地质*, 2022, 55(03): 96-107.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, JIA Jun, et al. Geo-hazards Research and Investigation in the Loess Regions of Western China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(03): 96-107.
- 王潇. 冻融循环条件下陕北府谷地区砂岩物理力学性质研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
- WANG Xiao. Study on the physical and mechanical properties of sandstone in Fugu region of Northern Shaanxi under the conditions of freeze-thaw cycles [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014.
- 王雁林, 任超, 李永红, 等. 关于构建陕西省地质灾害防治新机制的思考[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(03): 403-410.
- WANG Yanlin, REN Chao, LI Yonghong, et al. The construction of a new geological hazard prevention mechanism in Shaanxi Province[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(03): 403-410.
- 伍艳, 蔡怀森, 刘慧, 等. 砒砂岩抗剪强度与其结构特征关系[J]. *水利水电科技进展*, 2019, 39(05): 21-26.
- WU Yan, CAI Huaisen, LIU Hui, et al. Relationship between shear strength and structural characteristics of Pisha sandstone[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(05): 21-26.
- 熊德清, 崔笑烽. 喜马拉雅山脉地震带主要地质灾害与地形地貌关系——以西藏日喀则地区为例[J]. *地质通报*, 2021, 40(11): 1967-1980.
- XIONG Deqing, CUI Xiaofeng. The relationship between main geological hazard and topography in the Himalayan seismic belt: A case study in the Xigaze area, Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(11): 1967-1980.
- 张卜平, 朱兴华, 成玉祥, 等. 黄土潜蚀机理及其致灾效应研究综述[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(06): 41-52.
- ZHANG Buping, ZHU Xinghua, CHENG Yuxiang, et al. A review on loess subsurface-erosion mechanism and its hazard effects[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(06): 41-52.
- 张林梵, 王佳运, 张茂省, 等. 基于BP神经网络的区域滑坡易发性评价[J]. *西北地质*, 2022, 55(02): 260-270.
- ZHANG Linfan, WANG Jiayun, ZHANG Maosheng, et al. Evaluation of Regional Landslide Susceptibility Assessment Based on BP Neural Network[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(02): 260-270.
- 张茂省, 孙传尧, 校培喜, 等. 延安市宝塔区地质灾害详细调查示范[J]. *西北地质*, 2007, 40(02): 29-55.
- ZHANG Maosheng, SUN Chuanyao, XIAO Peixi, et al. A Demonstration Project for Detailed Geo-hazard Survey in the Baota District, Yan'an[J]. *Northwestern Geology*, 2007, 40(02): 29-55.
- 张茂省, 党学亚. 干旱半干旱地区水资源及其环境问题: 陕北榆林能源化工基地例析[M]. 北京: 科学出版社, 2014, 25-30.
- ZHANG Maosheng, DANG Xueya. Water resources and Environmental Problems in arid and semi-arid Area-Case study of Yulin Energy and Chemical Industry Base in Northern Shaanxi [M]. Beijing: Science Press, 2014, 25-30.
- 张茂省, 黎志恒, 王根龙, 等. 白龙江流域地质灾害特征及勘查思路[J]. *西北地质*, 2011a, 44(03): 1-9.
- ZHANG Maosheng, LI Zhiheng, WANG Genlong, et al. The Geological Hazard Characteristics and Exploration Ideas of the Bailong River Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2011a, 44(03): 1-9.
- 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. *工程地质学报*, 2011b, 19(04): 530-540.
- ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering Factors and Formation Mechanism of loess landslides[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011b, 19(04): 530-540.
- 张茂省, 唐亚明. 地质灾害风险调查的方法与实践[J]. *地质通报*, 2008, 27(08): 1205-1216.
- ZHANG Maosheng, TANG Yaming. Risk investigation method and practice of geohazards[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(08): 1205-1216.
- Feng L, Zhang S, Jin Z, et al. The critical mechanics of the initiation of loess flow failure and implications for landslides[J]. *Engineering Geology*, 2021, 288: 106165.
- Zezeze J L, Ferreira A B, Rodrigues M L. Landslides in the North of Lisbon Region (Portugal): Conditioning and triggering factors[J]. *Physics and Chemistry of the Earth: Part A Solid Earth and Geodesy*, 1999, 24(10): 925-934.