

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.04.011

榆林市无资料小流域山洪灾害风险评价

王 隄, 宋孝玉, 刘 雨, 魏婉茵, 张 玲, 赵新凯, 胡志强

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 作为我国最为严重的自然灾害之一,山洪灾害一直备受社会各界的关注。无资料小流域山洪灾害风险评价,对于提高风险区的预警预报能力、保护民众的生命财产安全、巩固脱贫攻坚成果等都具有重要的指导意义。以陕北榆林市 24 个小流域为研究对象,通过设计洪水及设计洪水位分析、防洪能力确定、暴雨预警响应级别判定和临界雨量计算,定量评价每个小流域的山洪灾害风险程度。研究结论:①榆林市 24 个沿河村落中,防洪能力小于 5 年一遇的极高风险区有 2 个、小于 5~20 年一遇的高风险区有 7 个、小于 20~100 年一遇的风险区有 14 个、大于 100 年一遇的低风险区有 1 个;②当发生暴雨蓝色预警时需要做出响应的村落有 2 个、暴雨黄色预警时需要响应的村落有 9 个、暴雨橙色预警时需要响应的村落有 8 个、暴雨红色预警时需要响应的村落有 5 个,分别占评价村落的 8.3%、37.5%、33.4%、20.8%;③临界雨量的大小与村落防洪能力、土壤含水量和流域位置有关,防洪能力弱、土壤含水量大且靠近上游的村落,其临界雨量相对较小。

关键词: 山洪灾害; 无资料地区; 设计洪水; 暴雨预警响应; 临界雨量

中图分类号: TV122; X43

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)04-0516-07

Risk assessment on mountain flood disasters in a small watershed without data in Yulin City

WANG Long, SONG Xiaoyu, LIU Yu, WEI Wanyin, ZHANG Ling,

ZHAO Xinkai, HU Zhiqiang

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: As one of the most serious natural disasters in China, mountain flood has been concerned by all sectors of society. The risk assessment on mountain flood disaster in the small watershed without data is of great significance for improving the ability of early warning and forecasting in risk areas, protecting the safety of people's lives and property, consolidating the achievements of poverty alleviation and so on. In this study, 24 small watersheds in Yulin, northern Shaanxi were studied. Design flood and design flood level analysis, flood control capacity determination, rainstorm early warning response level determination and critical rainfall calculation were carried out in sequence, with the risk degree of each small watershed quantitatively described, and the critical rainfall value determined. The conclusions are as follows: ① among the 24 villages along the river in Yulin, there are 2 extremely high risk areas with flood control capacity less than 5-year return period, 7 high-risk areas with 5-20-year return period, 14 risk areas with 20-100-year return period, and 1 low-risk area with more than 100-year return period; ② when the blue rainstorm warning is issued, there are 2 villages that need to respond, 9 villages need to respond to rainstorm yellow warning, 8 villages need to respond to rainstorm orange warning, and 5 villages need to respond to rainstorm red warning, each accounting for 8.3%, 37.5%, 33.4%, and 20.8% of the evaluated villages. This indicator can provide direct guidance for the start of flood control and transfer work for villages along the river; ③ the critical rainfall is

收稿日期: 2020-09-25; 网络出版日期: 2020-10-26

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20201023.1843.012.html>

基金项目: 陕西省防汛抗旱总指挥部办公室资助项目(104-481018029)

第一作者: 王隄,男,硕士生,研究方向为水文学及水资源。E-mail:651552972@qq.com

通信作者: 宋孝玉,女,博士,教授,博导,研究方向为水文学及水资源。E-mail:songxy@xaut.edu.cn

related to the flood control capacity of villages, soil moisture content and watershed location. The villages with weak flood control capacity, large soil moisture content and close to the upstream have relatively small critical rainfall.

Key words: mountain flood disaster; area without data; design flood; rainstorm warning response; critical rainfall

小流域山洪是山地丘陵沟壑区因降雨而引起的、一种危及人民生命财产安全的灾害形式,其具有来势猛、成灾快、破坏性强以及预测预防难度大等特点^[1]。山洪灾害频发已经成为中国防洪减灾工作中亟待解决的问题^[2]。2015年2月在我国水利部发布的《山洪灾害分析评价方法指南》中,对如何进行山洪灾害外业调查、内业分析与计算以及山洪灾害预警平台建设等工作都提出了详细、科学的安排和要求,为规范全国山洪灾害的分析和评价工作起到了积极的推动作用。其中,进行防洪风险评价及山洪灾害的预警工作是重中之重,是减少人员伤亡和财产损失的有效手段^[3]。目前,山洪灾害风险评价方法主要分5类:GIS分析法^[4];模型模拟评价法^[5];可变模糊评价法^[6];基于机器学习的风险评价法^[7];主成分分析法^[8]。崔洋等^[9]采用 FloodArea 模型模拟与 ArcGIS 空间叠加统计分析相结合的方法,对贺兰山银川段不同重现期的山洪灾害风险与影响区划进行了研究;冯快乐等^[10]基于 BP 神经网络,对湖北省山洪灾害危险性进行了评价;王一新等^[8]基于主成分分析法,对中国 21 座城市的防洪减灾能力进行了综合评价。

上述研究通过将各项致灾因素(例如降水、产汇流参数、坡度、比降、植被覆盖、河网密度等^[11])转化为特定的评价指标,按照权重综合分析得出研究区域的危险程度分区,只能给出危险性的分布情况这一确定性评价。当这些研究应用于无资料、村民居住点分布零散且情况复杂的小流域沿河村落的山洪灾害风险评价工作时,存在明显不足:难以给出定量的防洪能力及预警雨量。因此,本文先通过 2019 年外业实测获得的小流域河道断面信息、沿河村落居民的房屋宅基地高程、下垫面参数及成灾水位等数据,经内业计算得到设计洪水位,将其与成灾水位进行比较,确定小流域的防洪能力。再引入中国气象局发布的暴雨预警等级标准,定量描述每个小流域的风险响应程度,并采用水位流量反推法^[12]计算得到各个小流域在三种不同前期土壤含水量条件下的预警雨量,以为小流域山洪灾害风险评价及预警工作提供数据支撑与科学指导。

1 研究区概况

榆林市(北纬 $36^{\circ}57' \sim 39^{\circ}35'$,东经 $107^{\circ}28' \sim$

$111^{\circ}15'$)位于陕西省最北部,西邻甘肃、宁夏,北连内蒙古,东隔黄河与山西相望,南与陕西省延安市接壤,其北部为风沙草滩区,占总面积的 42%,南部为黄土丘陵沟壑区,占总面积的 58%。榆林市多年平均年降水量为 404 mm,降水量时空分布极不均匀,6~9 月份降水量占年降水量的 75%以上,空间上则表现为南部较多、东北部次之、西北部偏少。榆林市的水系主要由四河(无定河、窟野河、秃尾河、佳芦河)、四川(皇甫川、清水川、孤山川、石马川)及其支流组成,各河流洪水的主要成因是 7~9 月出现最多的暴雨,榆林市水系图及防灾对象分布见图 1。由于榆林市境内植被覆盖度较低、雨强大,所以洪水来势猛,陡涨陡落,其峰形尖瘦、峰高量大,容易引发山洪灾害。

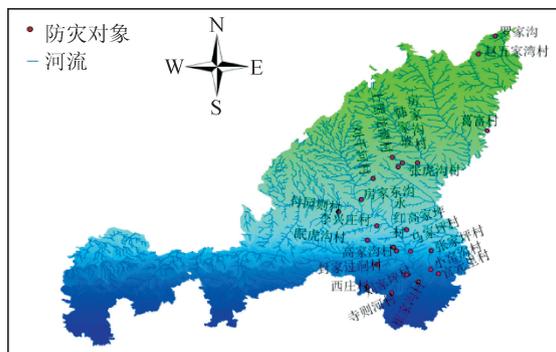


图 1 榆林市防灾对象分布图

Fig. 1 Distribution of disaster prevention objects in Yulin

2 研究资料及方法

2.1 资料来源

本研究使用的资料包括如下两部分。

1) 外业资料。榆林市 2019 年 24 个小流域(见表 1)河道断面测量资料和下垫面糙率;沿河村落居民房屋位置和宅基地高程数据;历史山洪资料。

2) 内业资料。中央层级下发的榆林市各县小流域土壤植被数据;《榆林市实用水文手册》(西安理工大学、榆林市水利工作队,2014 年 12 月)提供的榆林市 1961—2010 年短历时、强降雨暴雨资料及榆林市降雨自然特点与雨洪特性规律;使用 Google Earth 在 30 M 空间分辨率下量算可以得到流域集水面积 F 、主沟长度 L 、主河沟纵坡比降 J ,再将 L 的量算长度与外业实测长度进行对比,发现软件量算的结果在误差允许的范围。

表1 榆林市山洪灾害风险评价小流域个数统计表(2019年)

Tab.1 Statistical table of the number of small watersheds for mountain flood risk assessment in Yulin

| 行政区划 | 横山县 | 府谷县 | 米脂县 | 神木县 | 子洲县 | 绥德县 | 清涧县 | 榆阳区 | 合计 |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 小流域数量/个 | 1 | 2 | 2 | 1 | 4 | 7 | 1 | 6 | 24 |

2.2 研究方法

2.2.1 防洪现状评价

1) 设计洪水计算与洪水位分析

根据《榆林市实用水文手册》(下称水文手册),先计算不同频率的设计点暴雨量,再经点面转化得到设计面雨量,然后按照概化雨型时程分配表进行雨量分配,选取符合流域特征的产流模式进行产汇流计算^[13],最终求得不同频率的设计洪峰流量及相应的汇流历时^[13]。进而通过曼宁公式推算各个断面的水位流量关系,得到不同设计洪峰流量所对应的河道洪水位。

2) 暴雨预警级别响应

根据外业测量得到的居民宅基地高程和河道断面数据,先得到沿河村落的成灾水位,成灾水位的确定方法见图2。再将计算所得各频率对应的设计水位与成灾水位进行比较,判断该村落是否成灾,如果成灾则绘制频率流量曲线,将成灾水位换算成对应的洪峰流量,采用插值法即可得到成灾水位对应的频率,进而确定防洪能力。村落的防洪能力与成灾水位的确定有直接的关系。由确定的防洪能力可以反算出设计面雨量,最终得到其对应的暴雨预警响应等级(见表2)。

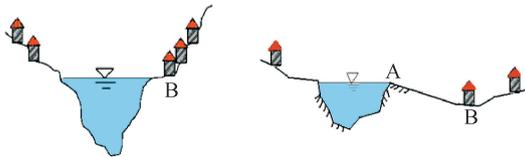


图2 控制断面形状例图

Fig.2 Control section shape diagram

图注:成灾水位确定分两种情况,一是如图2左所示,住户B的宅基地高程为成灾水位;二是如图2右所示,成灾水位不能设定为住户B的宅基地高程,当水位高于A点高程后才致灾,故A点高程为成灾水位。

表2 暴雨预警等级信息表^[14]Tab.2 Rainstorm warning level information table^[14]

| 降雨历时/h | 降雨量/mm | 暴雨预警级别 |
|--------|--------------------|----------|
| 12 | 将要或者已经达到50,且有可能持续 | 蓝色预警(Ⅳ级) |
| 6 | 将要或者已经达到50,且有可能持续 | 黄色预警(Ⅲ级) |
| 3 | 将要或者已经达到50,且有可能持续 | 橙色预警(Ⅱ级) |
| 3 | 将要或者已经达到100,且有可能持续 | 红色预警(Ⅰ级) |

2.2.2 预警指标确定

1) 预警时段确定

预警时段是雨量预警指标的重要组成部分,主要受上游集水面积大小、地形地貌、降雨强度、植被条件等因素的影响^[15],榆林地区的预警时段设定为1 h、2 h、3 h。

2) 临界雨量计算

因榆林地区以“超渗产流”为主,故在临界指标计算中采用水位流量反推法。根据前期雨量估算土壤含水量,分别采用前期影响雨量 $P_a=0.2I_m$ 、 $P_a=0.5I_m$ 及 $P_a=0.8I_m$ 的三个临界值对前期降雨较少、一般及较多3种情况的土壤含水量进行界定,代表流域土壤较干、一般及较湿3种情况^[13]。 I_m 为流域最大蓄水容量,根据水文手册确定榆林地区的 I_m 取值为100 mm。

临界指标包括立即转移雨量和准备转移雨量^[16],经水位流量反推得到对应的成灾频率,通过试算得到的预警时段对应降雨过程的雨量就是立即转移雨量,把立即转移雨量前推0.5 h的雨量为准备转移雨量。

2.2.3 工程实例

选取榆林市子洲县永红村所在小流域为例,根据外业测量和内业收集得到的资料和上述研究方法,说明榆林市小流域山洪灾害风险评价过程。

永红村位于子洲县双湖峪街道,图3所示为永红村小流域河道形状及其与住户的位置关系,表3为该河道的参数信息。

根据水文手册计算得到不同历时的点暴雨量和 C_v 均值,结合模比系数和点面转化系数可以计算得到各设计面暴雨量的值(见表4)。

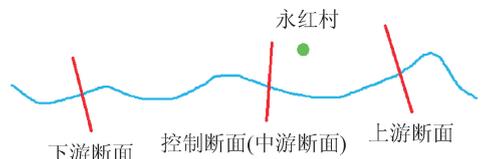


图3 永红村所在河道与居民相对位置图

Fig.3 Relative position of the river course and residents of Yonghong Village

表 3 永红村所在小流域河道信息表

Tab. 3 River channel information on Yonghong Village small watershed

| 行政区名称 | 经度 | 纬度 | 集水面积/km ² | 沟长/m | 比降/‰ | 糙率 | 成灾水位/m |
|-------|----------|---------|----------------------|-------|------|-------|--------|
| 永红村 | 110.10°E | 37.68°N | 27.5 | 9 350 | 13.5 | 0.029 | 930.59 |

表 4 永红村所在小流域不同设计面暴雨量计算结果表

Tab. 4 Area storm rainfall results of different design frequencies in Yonghong Village small watershed

| 历时/h | 均值/mm | 变差系数 Cv | Cs/Cv | 重现期雨量值 H _p /mm | | | | |
|-------|-------|---------|-------|---------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| | | | | 100 年(H _{1%}) | 50 年(H _{2%}) | 20 年(H _{5%}) | 10 年(H _{10%}) | 5 年(H _{20%}) |
| 0.167 | 12.60 | 0.54 | 3.5 | 36 | 32 | 26 | 21 | 17 |
| 1 | 30.07 | 0.60 | 3.5 | 94 | 82 | 65 | 52 | 40 |
| 6 | 47.42 | 0.65 | 3.5 | 161 | 138 | 108 | 85 | 64 |
| 24 | 55.52 | 0.67 | 3.5 | 194 | 166 | 130 | 102 | 76 |

1) 设计洪水计算与洪水位分析

根据表 4 中的计算结果,参照水文手册中的概化雨型对面雨量进行时程分配,采用超渗产流模式计算净雨,代入汇流计算中求得不同频率的 Q_m-τ 及

Q_m-t 两组关系曲线,以 100 年一遇(频率 1%)为例(见图 4),由两条曲线的交点得出设计洪峰流量和汇流历时^[16],计算出设计洪量,利用曼宁公式求得水位流量关系曲线(见图 5),结果见表 5。

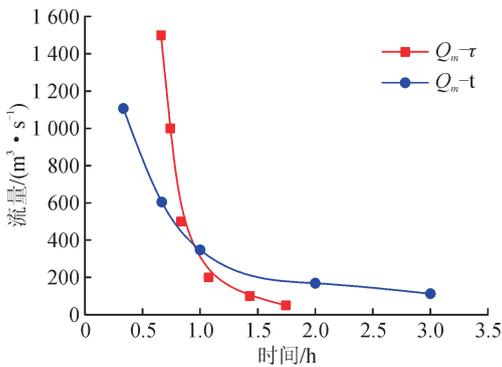


图 4 永红村 100 年一遇 Q_m-τ 及 Q_m-t 关系曲线图

Fig. 4 Q_m-τ and Q_m-t curves of 100-year return period in Yonghong Village

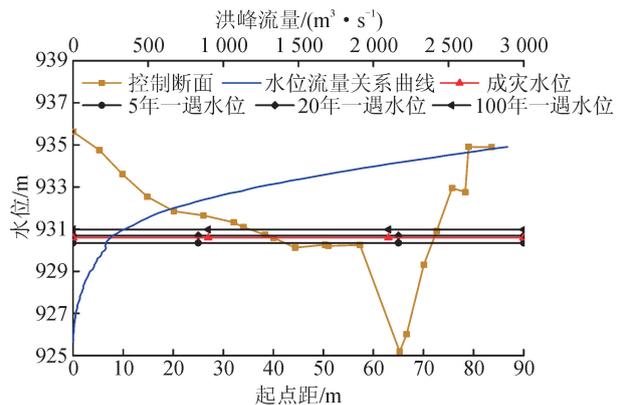


图 5 永红村小流域水位流量关系曲线图

Fig. 5 Stage discharge relationship curve of Yonghong Village small watershed

表 5 永红村小流域不同频率设计洪水结果表

Tab. 5 Design flood results of different frequencies in Yonghong Village small watershed

| 洪水要素 | 重现期洪水要素值 | | | | |
|---|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| | 100 年(H _{1%}) | 50 年(H _{2%}) | 20 年(H _{5%}) | 10 年(H _{10%}) | 5 年(H _{20%}) |
| 洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹) | 336.00 | 300.00 | 261.00 | 225.00 | 190.00 |
| 洪量/(万 m ³) | 380.01 | 306.72 | 217.05 | 155.56 | 100.67 |
| 汇流历时/h | 0.93 | 0.95 | 0.98 | 1.00 | 1.03 |
| 洪峰水位/m | 930.98 | 930.83 | 930.69 | 930.47 | 930.35 |

2) 暴雨预警级别响应

根据表 5 中的计算结果,以控制断面的设计洪水位及洪峰流量为边界条件,将糙率值、外业和内业测量的各控制断面及河道比降输入 HEC-RAS 软件,采用直接步进法逐断面推求整个河道的洪水水面线^[17]。

将不同频率水面线高程与成灾水位比较,确定沿河村落的防洪能力,先通过防洪能力对应的频率反算出设计面暴雨量^[18],再通过概化雨型进行时程分配得到不同历时下的降雨量,结果见表 6,最终对照表 2 确定永红村的暴雨预警响应等级为黄色(Ⅲ级)。

表6 永红村防洪能力对应的设计面雨量值表

Tab.6 Design area rainfall corresponding to flood control capacity of Yonghong Village

| 降雨历时/h | 面雨量/mm |
|--------|--------|
| 1 | 33 |
| 2 | 36 |
| 3 | 40 |
| 4 | 44 |
| 5 | 48 |
| 6 | 53 |

3) 预警雨量结果

由临界洪峰流量对应的临界频率,推算出不同土壤含水条件下该临界频率的降雨过程。由于研究区域选择的预警时段分别为1 h、2 h、3 h,故降雨资料中1 h、2 h、3 h对应的雨量即为立即转移雨量,再把每个时段前推0.5 h对应的雨量即为准备转移雨量。永红村临界雨量计算结果见表7。

表7 永红村三种不同土壤含水条件下临界雨量表
Tab.7 Critical rainfall under three different soil moisture conditions in Yonghong Village

| 预警时段/h | 立即转移雨量/mm | | | 准备转移雨量/mm | | |
|--------|-----------|----|----|-----------|----|----|
| | 较干 | 一般 | 较湿 | 较干 | 一般 | 较湿 |
| 1 | 34 | 33 | 32 | 14 | 13 | 12 |
| 2 | 38 | 36 | 35 | 18 | 17 | 16 |
| 3 | 42 | 40 | 38 | 20 | 18 | 17 |

3 结果与讨论

3.1 防洪现状评价

根据前述方法和工程实例,对榆林市共计24个村落的流域山洪灾害进行防洪现状评价,得到榆林市沿河村落设计洪水分布图和榆林市沿河村落暴雨预警响应等级分布图,见图6和图7。

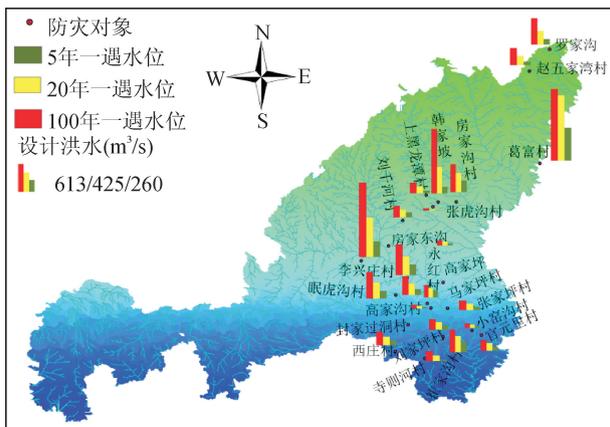


图6 榆林市沿河村落设计洪水分布图
Fig.6 Design flood distribution of villages along the river in Yulin

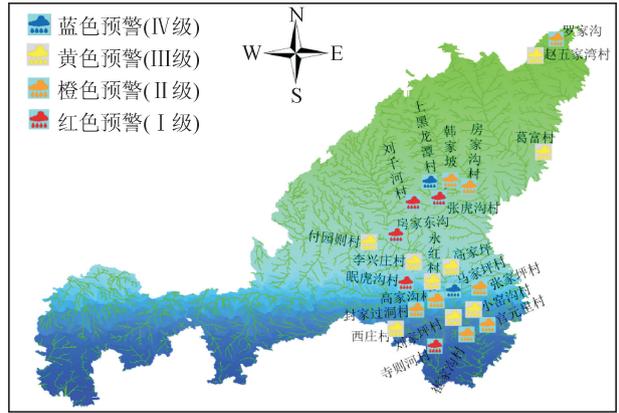


图7 榆林市沿河村落暴雨预警响应等级图
Fig.7 Rainstorm warning response level of villages along the river in Yulin

由图6可知,越靠近小流域沟道下游,其汇水面积就越大,且相同设计频率下的流域出口断面流量也越大。故分别处于同一沟道上、下游的小流域洪峰流量是从上游到下游依次增大的,因此,计算结果合理。

由图7可知,24个村中只有上黑龙潭村和马家坪村的响应级别为蓝色暴雨预警,其余村落的响应级别为黄色或更高级别暴雨预警。再结合居民宅基地高程数据可知,由于上黑龙潭村和马家坪村均有居民将房屋建设在河道中,或是村民的宅基地高程与洪水水面线高程相差很小,故当发生暴雨洪水时,必然会危及当地人民群众的生命、财产安全。

3.2 临界雨量确定

同样采用前述方法,可以得到榆林市24个沿河村落小流域的立即转移雨量和准备转移雨量分布图,见图8和图9。

由图8和图9可知,同一成灾流量下,由于前期土壤干湿情况不一致,小流域临界雨量的大小关系为较干>一般>较湿。由于在超渗产流模式下,土壤含水量越大则下渗能力越小,而越早达到稳定下渗率,故要产生同样大小的成灾流量则所需的降雨量也就越小。位于沟道下游的村落,如葛富村的立即转移雨量和准备转移雨量的差值较小,而位于所在沟道上游的永红村,其两项预警雨量指标的差值较大。这是由于上游的沟道比降大、流速快,洪水过程尖瘦,故将立即转移雨量前推0.5 h得到的准备转移雨量较小;而下游的比降相对较小,形成矮胖的洪水过程,准备转移雨量就和立即转移雨量大小相近。因此,临界雨量大小的主要影响因素有:防洪能力、土壤含水量、流域位置。依照本文方法进行临界雨量计算时,应该充分考虑上述三个因素,以此来构

建更为科学、合理的预警体系。

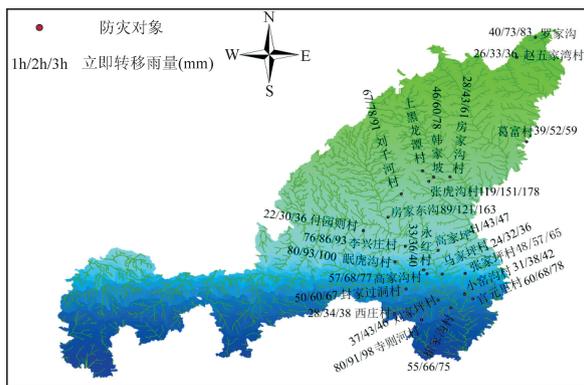


图8 榆林市沿河村落立即转移雨量图
Fig. 8 Rainfall map of immediate transfer in villages along the river in Yulin

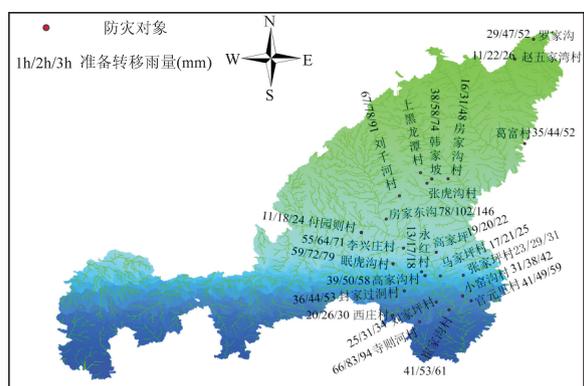


图9 榆林市沿河村落准备转移雨量图
Fig. 9 Rainfall map of readiness to transfer in villages along the river in Yulin

注:上黑龙潭村地区降水量较小,基本不产生径流,因居民房子修建在河槽沟道中,只要产流,房子就会被淹,因此预警雨量为零。

3.3 验证与讨论

本文的设计净雨采用超渗产流模型进行计算,设计洪水采用推理公式法和瞬时单位线法进行计算,产汇流参数均通过实测洪水进行验证,以上计算精度均满足要求。对位于同一沟道上、下游村落的设计洪峰流量进行对比,发现其大小关系为上游>中游>下游,说明趋势合理。预警雨量的验证采用推理公式法和瞬时单位线法分别计算,对比二者的大小发现结果相差不大,且在误差允许范围内,说明成果合理。

研究显示,榆林市小流域汇流时间和下垫面条件紧密相关:米脂县、子洲县、绥德县同属黄土崩状丘陵地貌,地形起伏变化较大,小流域汇流时间约为1 h;神木县地貌为黄土梁峁和风沙过度区,小流域汇流时间约为1.5 h;而横山、府谷、榆阳区由于地形逐渐平坦,且由黄土崩状丘陵区逐渐过渡到片沙黄土丘陵地貌,下垫面透水性逐渐增大,故汇流时间

相应增加,分别为3~4 h、4 h、6.2 h。不仅是汇流时间与下垫面条件密切相关,临界雨量亦同。在同一成灾水位下,沿河村落临界雨量的大小受到土壤含水量的直接影响,其大小关系表现为较干>一般>较湿,这是由于土壤含水量越低,在超渗产流模式下的下渗量便越大,则产生相同的成灾流量所需降雨量也便越大。这与翟晓燕等^[19]的研究结果一致。

但是,对于小流域而言,在发生较大洪水灾害之后,其下垫面条件、河道情况及沿河防洪工程措施等都会发生较大变化,且不容忽视,在有洪灾风险时,流域的产汇流时间、洪量和临界条件必然会发生变化,为洪灾防治增加了极大的不确定性。因此,密切关注下垫面条件的变化、不断完善山洪灾害防治体系、不断提高预报预警的精度以及将大数据等新兴技术用于防洪减灾工作中,都将是山洪灾害今后研究工作的重点。

4 结论

1) 榆林市24个沿河村落中,防洪能力小于5年一遇的极高风险区有2个,小于5~20年一遇的高风险区有7个,小于20~100年一遇的风险区有14个,大于100年一遇的低风险区有1个。

2) 当发布暴雨蓝色预警时需要做出响应的村落有2个、暴雨黄色预警时有9个、暴雨橙色预警时有8个、暴雨红色预警时有5个,分别占评价村落的8.3%、37.5%、33.4%和20.8%。

3) 临界雨量的大小与村落防洪能力、土壤含水量和流域位置有关,当降雨量达到准备转移雨量时,如果继续降雨,则可预测洪灾发生的时间,为及时做好防灾撤离工作做好准备。

参考文献:

- [1] 徐辉,曹勇,曾子悦. 基于FFPI的山洪灾害风险预警方法[J]. 灾害学,2020,35(3):90-95.
XU hui, CAO Yong, ZENG Ziyue. A method of flash flood risk early warning based on FFPI[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(3): 90-95.
- [2] 彭安帮,刘九夫,马涛,等. 辽宁省资料短缺地区中小河流洪水预报方法[J]. 水力发电学报,2020,39(8):79-89.
PENG Anbang, LIU Jiufu, MA Tao, et al. Flood forecasting method for medium-and small-size rivers short of hydrological data in Liaoning Province [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(8): 79-89.
- [3] 程卫帅. 山洪灾害临界雨量研究综述[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 901-908.
CHENG Weishuai. A review of rainfall thresholds for triggering flash floods [J]. Advances in Water Science,

- 2013,24(6):901-908.
- [4] 朱恒霖,李虎星,袁灿. 基于区域灾害系统 ArcGIS 的山洪灾害风险评价[J]. 人民黄河,2019,41(6):21-25.
ZHU Hengkang, LI Huxing, YUAN Can. Study on the risk assessment of torrent flood disaster based on regional disaster system and ArcGIS[J]. Yellow River, 2019,41(6):21-25.
- [5] 田丰,张军,冉有华,等. 不同空间尺度的山洪灾害风险评价模型对比研究[J]. 干旱区地理,2019,42(3):559-569.
TIAN Feng,ZHANG Jun,RAN Youhua, et al. Model comparison of mountain torrent disaster risk assessment in different spatial scale [J]. Arid Land Geography, 2019,42(3):559-569.
- [6] 赵刚,庞博,徐宗学,等. 中国山洪灾害危险性评价[J]. 水利学报,2016,47(9):1133-1142,1152.
ZHAO Gang, PANG Bo, XU Zongxue, et al. Assessment on the hazard of flash flood disasters in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(9): 1133-1142,1152.
- [7] 周超,方秀琴,吴小君,等. 基于三种机器学习算法的山洪灾害风险评价[J]. 地球信息科学学报,2019,21(11):1679-1688.
ZHOU Chao, FANG Xiuqin, WU Xiaojun, et al. Risk assessment of mountain torrents based on three machine learning algorithms [J]. Journal of Geo-information Science,2019,21(11):1679-1688.
- [8] 王一新,苑希民. 基于主成分分析的城市防洪减灾能力综合评价[J]. 自然灾害学报,2016,25(6):1-8.
WANG Yixin, YUAN Ximin. Comprehensive evaluation of urban flood control and disaster reduction ability based on principal component analysis [J]. Journal of Natural Disasters,2016,25(6):1-8.
- [9] 崔洋,常倬林,左河疆,等. 贺兰山银川段不同重现期山洪灾害风险与影响区划研究[J]. 干旱区地理,2020,43(4):859-870.
CUI Yang, CHANG Zhulin, ZUO Hejiang, et al. Study on risk and impact zoning of different return period flash flood disasters in Yinchuan section of Helan Mountain [J]. Arid Land Geography, 2020,43(4):859-870.
- [10] 冯快乐,周建中,江焱生,等. 基于 BP 神经网络的湖北省山洪灾害危险性评价[J]. 自然灾害学报,2018,27(1):148-154.
FENG Kuaile, ZHOU Jianzhong, JIANG Yansheng, et al. Assessment on the hazard of flash flood disaster in Hubei Province based on BP neural network [J]. Journal of Natural Disasters,2018, 27(1): 148-154.
- [11] 罗日洪,黄锦林,唐造造. 基于 AHP 和 GIS 的山区小流域山洪灾害风险区划研究[J]. 灾害学,2018,33(2):64-69.
LUO Rihong, HUANG Jinlin, TANG Zaozao. Study on freshet disaster risk zonation at small mountainous watershed base on AHP and GIS [J]. Journal of Catastrophology,2018,33(2):64-69.
- [12] 周慧妍,瞿思敏,单帅,等. 云南省缺资料小流域临界雨量计算分析[J]. 水电能源科学,2020,38(8):14-17,40.
ZHOU Huiyan, QU Simin, SHAN Shuai, et al. Analysis of critical rainfall calculation in small watershed with insufficient data in Yunnan Province[J]. Water Resources and Power,2020,38(8):14-17, 40.
- [13] 魏炳乾,杨坡,罗小康,等. 无资料中小流域山洪灾害分析与评价[J]. 自然灾害学报,2019,28(3):158-165.
WEI Bingqian, YANG Po, LUO Xiaokang, et al. Analysis and evaluation of mountain flood disaster in small watershed without data [J]. Journal of Natural Disasters,2019,28(3):158-165.
- [14] 气象灾害预警信号发布与传播办法[S]. 北京:中国气象局,2007.
- [15] 江锦红,邵利萍. 基于降雨观测资料的山洪预警标准[J]. 水利学报,2010,41(4):458-463.
JIANG Jinhong, SHAO Liping. Standard of mountain flood warning based on the precipitation observation data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4):458-463.
- [16] 赵然杭,王敏,陆小蕾. 山洪灾害雨量预警指标确定方法研究[J]. 水电能源科学,2011,29(9):49-53.
ZHAO Ranhang, WANG Min, LU Xiaolei. Research on determination method for rainfall warning indexes of torrential flood disaster [J]. Water Resources and Power,2011,29(9):49-53.
- [17] 杨坡,魏炳乾,李新善,等. 沿河村落山洪灾害危险区等级的定量划分研究[J]. 自然灾害学报,2018,27(3):130-135.
YANG Po, WEI Bingqian, LI Xinshan, et al. Study on the quantitative division of dangerous areas of flood disasters along the river villages [J]. Journal of Natural Disasters,2018,27(3):130-135.
- [18] 王新宏,唐永鹏,张美洋,等. 基于水位/流量反推法的资料匮乏地区临界雨量研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(4):125-128.
WANG Xinhong, TANG Yongpeng, ZHANG Meiyang, et al. Research on critical rainfall in data deficient region based on inversion method of water level/flow[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016,27(4):125-128.
- [19] 翟晓燕,郭良,刘荣华,等. 前期土壤湿度和降雨对小流域山洪预警指标的影响评估[J]. 地理研究,2019,38(12):2957-2965.
ZHAI Xiaoyan, GUO Liang, LIU Ronghua, et al. Impact assessment of antecedent soil moisture conditions and rainfall variability on flash flood warning index at catchment scale [J]. Geographical Research, 2019, 38(12):2957-2965.