

辛鹏,屈丽玮,郝苏娟,等. 宝鸡市 2020 年 8 月 16 日降雨地质灾害动态危险性评估[J]. 陕西气象,2023(2):61-68.

文章编号:1006-4354(2023)02-0061-08

宝鸡市 2020 年 8 月 16 日降雨地质灾害 动态危险性评估

辛 鹏^{1,2,3},屈丽玮^{3,4},郝苏娟⁵,黄 森⁶

(1. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;

2. 自然资源部地质灾害陕西宝鸡野外科学观测研究站,北京 100081;

3. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710014;

4. 陕西省气象台,西安 710014;5. 陕西省气象服务中心,西安 710014;

6. 咸阳市水利水电规划勘测设计院,陕西咸阳 712000)

摘 要:降雨诱发的群发性黄土崩滑灾害具有发育面积大、数量多、破坏力强的特征。为有效防控该类群发性灾害风险,需探索建立相应的危险性评估技术流程。在陕西宝鸡市 1:50 000 地质灾害详细调查与群发性灾害阈值调查研究的基础上,以 2020 年 8 月 16 日持续性降雨事件为例,探索完成了 24 h 内降雨诱发地质灾害危险性评估。计算分析显示:基于灾害发生的降雨量与持续时间阈值关系式,叠加 1:50 000 精细的易发性分区结果,可实现市域 24 h 内降雨诱发地质灾害动态危险性评估,其结果能够较好地反映高危险区域的动态扩展趋势。若继续探索完善降雨量阈值判别模型与评估技术流程,可提高地质灾害风险区划的时效性。

关键词:宝鸡市;降雨;地质灾害;危险性;评估

中图分类号:P694

文献标识码:A

降雨是我国西北地区黄土崩滑灾害的主要诱发因素之一。近年来,随着西北地区气候暖湿化,强降雨诱发黄河流域的群发性灾害事件日益增多^[1-4]。2013 年 7 月 1 日 08 时至 31 日 18 时,陕西延安地区遭遇持续性降雨,延川县境内的累积降雨量高达 607 mm。降雨诱发地质灾害达到 8 000 余处,造成 42 人死亡,累积的经济损失超过百亿元^[1-2]。同年 6 月 19 日至 7 月 25 日,渭河中上游的天水市秦州区出现持续性降雨,导致娘娘坝镇发生数万处山体崩滑灾害,20 多名群众因灾死亡^[3-4]。2021 年 10 月 2 日至 7 日,山西出现有气象记录以来最强秋汛,37 条河流发生洪水,数百处山体发生崩滑,公路、铁路运行受到影响。

降雨诱发的地质灾害具有“大雨大滑、小雨小滑”的特征,降雨量及持续时间是区域地质灾害危险性变化的关键要素。当前,区域地质灾害危险性动态评估多为未来 24 h 全国或省域气象地质灾害的变化趋势,提高危险性评估的精度是当前的热门研究问题^[5-18]。如:在陕西省气象地质灾害危险性评估技术流程研究中,张雅斌等^[6]将危险性评估流程分为地质灾害易发性分区、前期 24 h 内的降雨量及未来 24 h 的雨量的分析、危险性分区三个步骤。为区分降雨量对灾害活动强度的影响,周丹等^[16]提出将降雨划分为暴雨、连续降雨两种类型,并探讨了不同区域降雨日数诱发灾害的临界值,划分了五级预报预警标准。基于延

收稿日期:2022-04-25

作者简介:辛鹏(1984—),男,汉族,湖北枣阳人,博士,研究员,从事地质灾害形成机理及其风险评估研究。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42077276);陕西省自然科学基金基础研究项目(2022JM-153);陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2021G-12)

安地区的降雨入渗现场观测试验,唐亚明等^[17]提出当日及前 15 日累积降雨量 10.1~20.0 mm 为滑塌的降雨预警值^[16]。也有学者提出利用前期雨量、未来 24 h 雨量和逐日降雨影响系数进行地质灾害危险等级划分^[7]。上述研究工作为建立高精度的地质灾害危险性判别模型提供了基础^[18-20]。然而,这些分析还不能满足未来 24 小时内逐小时气象地质灾害危险性的评估需求,如何定量评估短时强降雨诱发地质灾害的危险性?是否可以开展未来 24 小时内危险性评估?类似上述问题尚缺少系统性的探索分析。

陕西省宝鸡市位于渭河中下游,既是秦岭—六盘山山地、陕北黄土高原和渭河平原交汇部位,又是我国南北气候分水区。区内地貌类型包括山地、丘陵、平原等,地形相对高差为 10~1 000 m。第四纪崩坡积物、松散黄土层及新近纪硬土软岩等易滑地层发育。在持续降雨或短时强降雨作用下,易滑岩土体会遇水软化而滑动。2007—2012 年,中国地质科学院地质力学研究所对宝鸡 12 个区县进行了 1:50 000 地质灾害详细调查,累积编录了地质灾害 1 626 处,初步进行了市域地质灾害易发性评估^[21-24]。2012—2020 年期间,又开展了中岩山、金顶寺等典型黄土滑坡的实时监测,初步确定相同地貌类型的黄土斜坡具有相似的临界降雨阈值^[19-20]。此外,随着宝鸡市气象数据监测精度的提高,气象预报预警研究及业务应用已精细到各个乡镇,初步具备了更进一步探索市域地质灾害危险性动态评估技术的基础。本文以陕西省宝鸡市地质灾害详细调查编录为基础,开展了区域 1:50 000 地质灾害易发性精细评估,以 2020 年 8 月 16 日 00—23 时降雨过程为例,叠加该时段区域降雨量,划分了市域地质灾害危险性等级,探索了 24 h 内市域地质灾害危险性评估的技术流程。

1 资料方法

1.1 资料

研究范围为 33.12°N~35.41°N、106.32°E~107.8°E。与研究相关的数据包括:宝鸡市地质图、1:50 000 地质灾害分布图、地形图、多期遥感影像图及雨量站数据(图 1)。其中,地质图的

比例尺为 1:200 000。1:50 000 地质灾害分布图包括 1 626 处滑坡、崩塌及泥石流的分布位置(图 1)。地形图由 Wordview 立体像对 DEM 数据生成,每个栅格的大小 25 m。遥感影像为 2020 年多期 Pleiades 历史存档数据。小时降雨数据来自于宝鸡市 174 个雨量站的 2020 年 8 月 16 日 00—23 时数据。在上述数据整理分析的基础上,补充开展了降雨诱发的金台区新近发生的地质灾害分布规律调查,为验证区域危险性评估结果的准确性提供了基础。

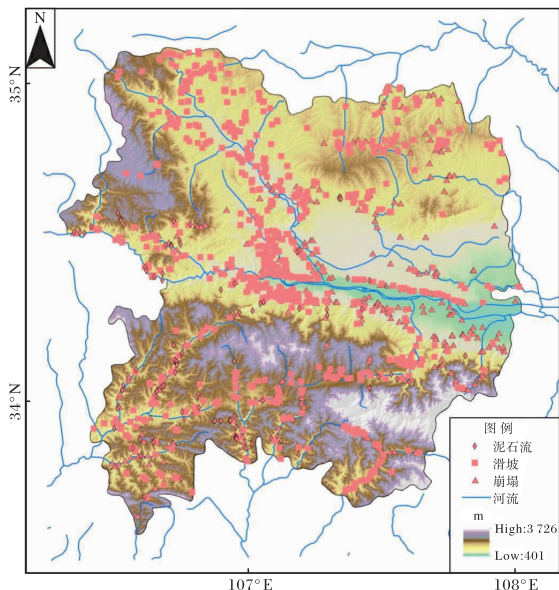


图 1 宝鸡市地质灾害分布示意图
(审图号为 JS(2016)01-126 号)

1.2 技术方法

宝鸡地区的山地、丘陵、平原、坡地等地貌单元内有着不同的孕灾能力。因地形高差不同,当遭遇不同强度、持续时间降雨时,各地貌单元诱发地质灾害的冲击距离、活动强度有差异。为区分各区域孕灾能力的差异性,将地质灾害划分为四类地区,分别为高易发区、中易发区、低易发区与极低易发区;对应灾害的易发性分区,将降雨诱发灾害活动强度分为高危险区、中危险区、低危险区及极低危险区。

分三步开展区域地质灾害动态危险性评估(图 2)。第一步利用多期遥感影像、地形数据解译与地质调查,准确获取区域内各地质灾害的分

布高程、地形高差、坡度、地层岩性与植被覆盖指数,应用信息量模型法统计分析控灾因素易发性大小,定量完成地质灾害易发性区划;第二步确定降雨诱发各易发区发生群发性地质灾害的临界降雨量阈值;第三步计算确定区域地质灾害的危险性,基于数据叠加、迭代分析的方法,并考虑小时累积降雨的灾害效应,评估逐小时降雨诱发地质灾害的危险性。

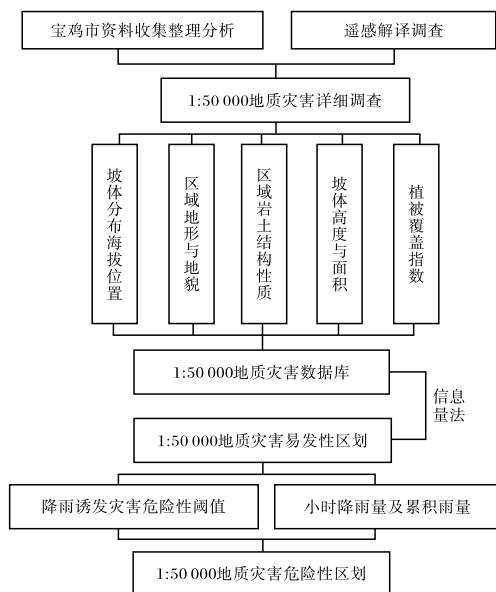


图2 地质灾害动态危险性评估技术路线

2 结果与分析

2.1 地质灾害易发性分区

持续性降雨、短时强降雨是宝鸡地区群发性地质灾害的主要诱发因素。1949年至2022年,有记载的降雨诱发地质灾害事件至少125次以上,群发事件超过9起(表1)。据资料统计,1989年7月15日00:40—16日12:00,陈仓区县功地区降雨量288 mm,暴雨中心区降雨量300 mm以上,降雨诱发滑坡灾害97处^[25]。2011年8月16日—9月20日,金台区、渭滨区降雨量373 mm,降雨诱发地质灾害883处。2016年以来,年均降雨量呈逐年增多趋势,群发性地质灾害随之增多。2020年8月16—19日,局地72 h降雨量超过250 mm,金台区内发生黄土滑坡灾害超86处。2021年9月底至10月初,宝鸡地区出现持续性降雨,区内诱发滑坡超过460处。通过对上述降雨诱发地质灾害案例的调查分析可见,渭河黄土塬边地形陡变带较北部黄土丘陵区更易发生滑坡灾害,活动强度也更强。

海拔高程、斜坡高度、斜坡坡度、地层岩性与植被覆盖程度对某一地区灾害发生的贡献存在差异性。为定量确定宝鸡市全域内地质环境因子的孕灾能力大小,利用信息量模型的方法,统计分析

表1 宝鸡市极端地质灾害事件列表(1989—2021年)

序号	时间	位置	相关情况
1	1989-07-15	陈仓区、千阳县	16 h持续降雨300 mm,诱发滑坡97处,出现中型灾情。
2	2011年8—9月	金台区、渭滨区	40多天持续降雨373 mm,诱发滑坡883处,出现中型灾情。
3	2008-04-26	扶风城关卫校	降雨、地表水入渗诱发黄土滑坡,出现中型灾情。
4	1983-09-28	眉县马家镇小学	降雨引起黄土滑坡,造成大型灾情。
5	1985-08-19	千阳阎家阴坡	降雨诱发黄土滑坡,导致小型灾情,120 hm ² 地被毁。
6	1985-09-02	渭滨区夏牙壑	降雨诱发大型黄土滑坡,140多间房屋受损,整体搬迁。
7	2012-09-17	金台区、渭滨区	降雨量达到373 mm,诱发黄土滑坡187处。
8	2020-08-16	金台区	72 h降雨量达到250 mm,诱发黄土滑坡86处。
9	2021年9—10月	金台区、陈仓区	1个月内降雨量超过675 mm,诱发滑坡超过460处。

了全市1 626处灾害的海拔高程、斜坡高度、斜坡坡度、地层岩性与植被覆盖程度,按照层次分析法,将每个要素分为4~9个层级,依次用每个层级内滑坡发育面积 N_j 除以滑坡总面积 S_j ,再求取宝鸡市域内要素发育的面积 N 除以总面积 S ,

上述两个数值相比后求对数,得到每个要素等级的易发系数 I_j (表2),计算如下:

$$I_{A_j \rightarrow B} = \ln \frac{P(B/A_j)}{P(B)} = \ln \frac{N_j/S_j}{N/S} \quad (j=1, 2, \dots, n). \quad (1)$$

其中： $I_{A_j \rightarrow B}$ 为对应成灾要素 A 中第 j 区间地质灾害的易发性； N_j 为对应成灾要素 A 中第 j 区间的地质灾害面积； S_j 为对成灾要素 A 中第 j 区间的分布面积； N 为区域地质灾害的总分布面积； S 为区域总面积即宝鸡市面积。

根据表 2 中求取的地质环境各要素易发性系

数 I_j ，对全区域所有的地形地貌、地层岩性、斜坡高度、植被覆盖程度图层进行赋值，进行空间分析求和计算，得到宝鸡市域的易发性系数。可以看出，区域大型黄土古、老滑坡体最易再次发生崩滑灾害，当坡度在 $30^{\circ} \sim 84^{\circ}$ 时，且坡高大于 171 m，植被指数在 148~216 之间时，斜坡具有地质灾害

表 2 宝鸡市地质灾害易发程度影响因素信息量计算结果

地质环境要素	要素区间 j	滑坡数量与面积			易发性系数	
		灾点数/处	滑坡面积 S_j/km^2	要素面积 N/km^2	I_j	排序
地层岩性	滑坡堆积体	148	3.71	205.4	1.06	2
	弱湿陷性黄土	181	1.71	2 364.1	-0.41	32
	黄土	430	8.48	2 910.2	0.98	4
	层状含软弱层碎屑岩组	19	0.06	323.8	-1.78	43
	次坚硬层变质-碎屑岩组	101	0.12	10 950.2	-2.22	47
	软弱层状碎屑岩组	20	0.14	199.8	-5.63	53
海拔高程/m	490~574	113	0.17	832.8	-1.61	40
	574~931	531	11.80	3 249.1	1.24	1
	931~1 141	307	2.75	2 491.8	0.04	23
	1 141~1 291	239	3.67	2 320.1	0.41	12
	1 291~2 588	353	1.46	9 697.4	-1.94	45
	2 588~3 767	2	0.00	364.4	-5.71	54
地形坡度/($^{\circ}$)	0~10	54	11.70	10 025.3	0.19	18
	10~15	96	6.81	3 868.3	0.64	6
	15~20	156	1.61	2 610.1	-0.41	33
	20~25	176	0.24	1 493.1	-1.71	42
	25~30	169	0.06	671.8	-2.32	48
	30~84	797	0.10	2 870.8	-5.71	55
地形坡高/m	0~16	125	5.51	3 442.4	-1.13	37
	16~36	519	6.38	3 990.5	0.19	19
	36~54	396	5.87	3 669.8	0.63	7
	54~72	247	4.31	2 696.5	0.45	9
	72~91	118	3.32	2 075.4	-0.29	30
	91~112	58	2.41	1 510.4	-1.54	39
	112~137	49	1.56	981.1	-2.49	49
	137~171	27	0.82	513.8	-3.11	51
归一化植被指数	171~246	5	0.27	170.7	-3.08	50
	0~77	0	0.00	22.8	—	—
	77~102	18	0.12	66.9	0.51	8
	102~148	480	7.25	2 454.1	0.99	3
	148~216	1 047	7.94	11 412.4	-0.45	34
	216~256	0	0.00	26.4	—	—

高易发性。按照四分法进行了易发性分区、分级(图 3),计算结果重分类后显示:高易发区分布于黄土丘陵的分水岭、秦岭山前与渭河、千河、嘉陵江等大型河谷沿岸,分区面积 2 720.8 km²,占全区土地总面积的 14.97%;中易发区分布于北山黄土梁、西部陇山及南部秦岭的二级支沟内,分区面积 3 503.65 km²,占全区面积的 19.28%;低易发区分布于秦岭、六盘山与北山黄土梁过渡带,分区面积为 3 910.57 km²,占全区面积的 21.52%;极低易发区主要分布于秦岭、六盘山无人类活动扰动区、关中黄土台塬、渭河河谷内部,分区面积为 8 030.17 km²,占全区面积的 44.2%。

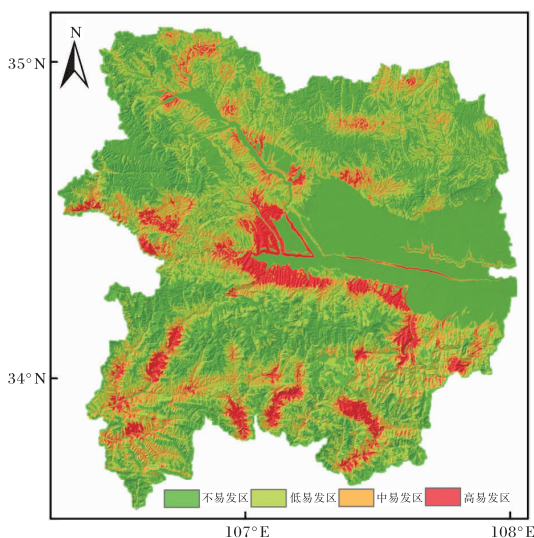


图 3 宝鸡市地质灾害易发性分区
(审图号为 JS(2016)01-126 号)

2.2 降雨量阈值确定

粉质黄土广泛分布于渭河中下游地区。他们既具有相似的水力性质,又是区域地质灾害的控滑地层。当发生持续降雨时,黄土质斜坡的坡度、坡高、土体的渗透系数会控制降雨入渗的深度。在相同地形地貌条件下,随着降雨量的增大,降雨持续时间的延长,地质灾害发生的风险会增大。

为确定不同易发区内降雨量阈值,黄森等^[19-20]以渭河上游天水市 2013 年 6 月 19 日至 7 月 25 日间持续降雨过程为例,利用高精度遥感影像与地形数据进行灾害分布解译,获取了不同地貌区的滑坡体的分布位置、面积,对应分析了 6 月 19 日、6 月 20 日、7 月 8 日、7 月 21 日与 7 月 25 日这五次强降雨

雨过程与崩滑体的面密度的相关性,更进一步计算分析这五次降雨过程中累积降雨量为 0~35 mm 时,降雨分布与滑坡面积间的关系,选用斯皮尔曼相关系数计算不同地质灾害易发区内降雨量与降雨持续时间的阈值关系式(见图 4)。

计算拟合得到各类地质灾害易发区的降雨量阈值公式如下:

$$\text{低易发区为 } I=25.021D^{-0.422}, \quad (2)$$

$$\text{中易发区为 } I=21.021D^{-0.424}, \quad (3)$$

$$\text{高易发区为 } I=19.881D^{-0.424}. \quad (4)$$

其中, I 代表降雨量阈值, D 代表降雨持续时间 h。根据公式计算显示:在低易发区,当降雨持续时间 $D=1$ h 时,降雨量阈值为 25.0 mm。在中易发区,降雨持续时间 $D=1$ h 时,降雨量阈值为 21.0 mm。在高易发区,当降雨持续时间 $D=1$ h 时,降雨量阈值为 19.8 mm;降雨持续时间 $D=2$ h 时,累积的降雨量阈值为 29.4 mm。

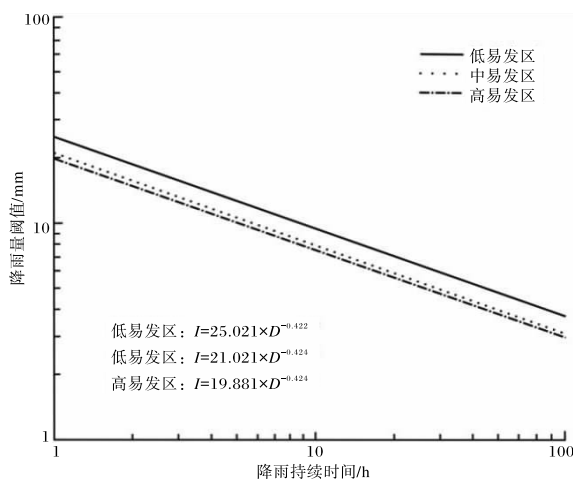


图 4 宝鸡各易发区降雨量-持续时间阈值曲线

2.3 地质灾害危险性动态评估

地质灾害的危险性反映降雨量的变化诱发黄土滑坡的活动强度、危险区域。将易发性分区图和降雨量数据进行叠加计算,按照矩阵分析法进行计算与等级判别,确定地质灾害危险性等级。参考全国和其他省份地质灾害气象预警预报等级划分,依据国际通用准则将宝鸡地质灾害危险性等级划分为 4 级,依次为高危险区、中危险区、危险区以及极低危险区(表 3)。受降雨入渗、汇聚作用影响,在地质灾害高易发区,当 1 h 内的降雨

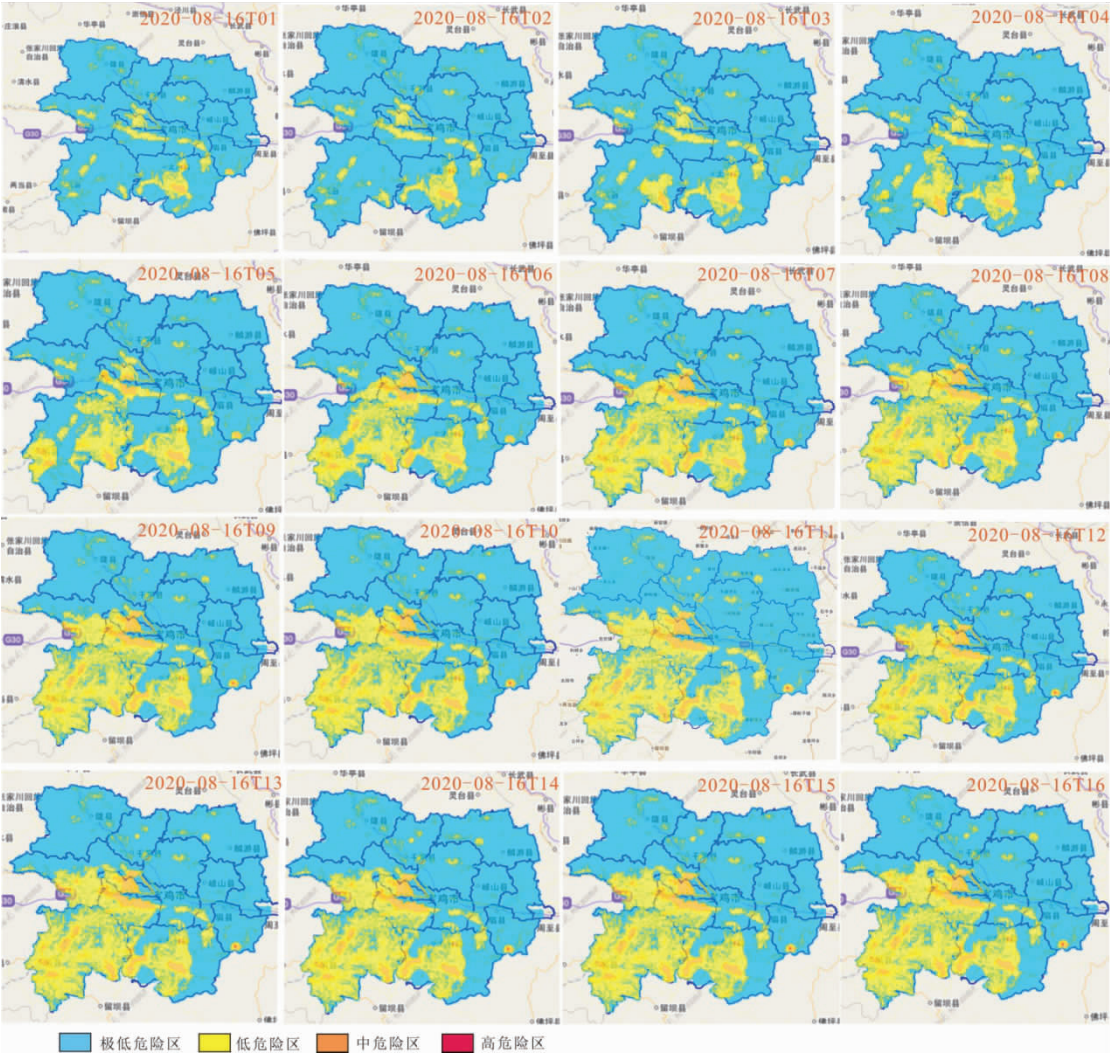
量达到阈值 19.8 mm 时,区域具有地质灾害高危险。当降雨量仅为上述阈值的 90% 时,即 17.8 mm 时,高易发区内具有地质灾害中危险。当降雨量为上述阈值的 80% 时,即 15.9 mm 时,高易发区内具有地质灾害低危险。当降雨量为上述阈值的 70% 时,即 13.8 mm 时,高易发区内具有地质灾害极低危险。同理,在高易发区内,2 h 内的累积降雨量阈值为 29.4 mm,在 2 h 内,地质

灾害中危险、低危险、极低危险的临界降雨量同样按照阈值 90%、80% 与 70% 计算。依次按照上述原则设置中易发区、低易发区的危险性计算的雨量阈值。具体设置方法见表 3,其中, A 代表各类地质灾害易发区临界降雨量阈值。

2020 年 8 月 16 日至 17 日,宝鸡市出现降雨。基于 1:50 000 地质灾害易发性分区,计算 8 月 16 日 00—23 时降雨诱发灾害的危险性分布(图 5)。

表 3 宝鸡区域地质灾害危险性易发分区

诱发灾害降雨量阈值	高易发区	中易发区	低易发区	极低易发区
A	高危险区	高危险区	中危险区	低危险区
A×90%	中危险区	低危险区	低危险区	极低危险区
A×80%	低危险区	低危险区	低危险区	极低危险区
A×70%	低危险区	极低危险区	极低危险区	极低危险区



可以看出:受持续降雨、雨量累积影响,地质灾害高风险区域逐步扩展。以金台区西部为例,00 时降雨量为 1 mm,01 时为 4 mm,02 时为 5 mm,03 时为 6 mm。00—03 时,高易发区内的降雨量逐步接近中危险性。

本次降雨过程中,宝鸡市的高危险区域集中于秦岭山区的凤县、太白县。随着降雨过程的持续与雨量的累积,宝鸡市区周边黄土塬边崩滑的危险性逐步增大。在整个降雨过程中,宝鸡市区的黄土塬边逐步发展为地质灾害的中危险区,低危险区的面积也逐步扩大,但宝鸡北部的麟游县、陇县等地区的危险性始终极低。鉴于上述评估可见,24 h 内危险性评估能够有效的反映市县域地质灾害危险性的时空扩展趋势。

3 讨论

为验证上述评估结果的可靠性,2020 年 8 月 16 日至 17 日对金台区地质灾害分布规律进行了调查,发现本次降雨新诱发灾害 86 处。其中的 68 处崩滑灾害发育于地质灾害高、中危险区,其余灾害点分布于低危险性与极低危险区。鉴于上述分析可见,市县域地质灾害小时危险性评估能够最大程度的反应危险区集中的范围、变化扩展的趋势。

市县域动态危险性评估灾害的发生区域、发生范围,可为决策者规划风险管控措施、部署应急力量等服务,能够有效了解危险性的扩展趋势。但这种方法也受限于底层数据与数学模型,很难聚焦到一个固定的场地。在关键点或者场地范围,会受到更微观地层岩性、水文地质环境、岩土体力学参数等地质结构的影响,区域地质灾害危险性预测评估需要的地质数据比例尺为 1:5 000 及以上。因此,各类比例尺的评估建立于不同数据、模型基础上。后续,1:50 000 市县域动态危险性评估会随着地质灾害详细调查精度的提高而提高,随着雨量站的增多以及模型计算速度的加快,评估结果也会更具有时效性。

4 结论

(1)宝鸡市位于陕北黄土高原与秦岭造山带的交汇部位,地貌单元多样,地质灾害高易发区占全区土地总面积的 14.97%,中易发区占全区面

积的 19.28%。在持续降雨、短时强降雨作用下,宝鸡市曾发生过群发性黄土滑坡,具有探索开展地质灾害动态危险性评估的基础与必要性。

(2)经过计算与野外验证,以 2020 年 8 月 16 日持续性降雨事件为例,完成的 24 h 内地质灾害危险性评估能够反映宝鸡市高危险区集中的区域、动态扩展趋势,可为地质灾害的风险主动防控提供依据。

(3)降雨量与持续时间阈值关系式是地质灾害动态危险性定量评估的重要依据,继续深化完善阈值判别曲线的精度具有实际应用价值。

致谢:文章写作过程中,得到陕西省气象信息中心张雅斌正研高工与贺音高工的指导,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 黄玉华,武文英,冯卫. 陕北延安“7·3”暴雨诱发地质灾害主要类型与特征[J]. 西北地质,2014,47(3):140-146.
- [2] 黄玉华,冯卫,李政国. 陕北延安地区 2013 年“7·3”暴雨特征及地质灾害成灾模式浅析[J]. 灾害学,2014,29(2):54-59.
- [3] 于国强,张茂省,胡炜. 天水市“7·25”群发性山洪地质灾害发育特征及成因分析[J]. 西北地质,2014,47(3):185-191.
- [4] 郭富赞,孟兴民,黎志恒. 天水市“7·25”群发性地质灾害特征及成因[J]. 山地学报,2015,33(1):100-107.
- [5] 赵奎锋,张雅斌. 陕西降雨型地质灾害气象预报预警系统[J]. 西北地质,2011,44(6):9-12.
- [6] 张雅斌,杜继稳,蔡蕊,等. 陕西省精细化地质灾害气象预报预警研究[J]. 灾害学,2011,26(3):28-34.
- [7] 王川,刘勇,张宏. 陕西省地质灾害预报预警研究[J]. 陕西气象,2003(6):10-12.
- [8] 李明,高维英,杜继稳. 诱发陕西黄土高原地质灾害降水因子分析[J]. 陕西气象,2009(5):1-5.
- [9] 石光普,王银花,刘世华,等. 甘肃靖远“8·10”致洪短时强降雨成因分析[J]. 陕西气象,2022(4):30-36.
- [10] 张建康,刘慧敏,康磊,等. 陕西黄土高原短时强降水时空分布及环流特征[J]. 陕西气象,2022

- (1):17-23.
- [11] 温铭生,王连俊,连建发,等. 区域地质灾害气象预警效果评价[J]. 工程地质学报,2011,19(6):839-843.
- [12] 王舒,贾健,张新军. 伊犁地质灾害气象监测预警服务效益评估析[J]. 陕西气象,2013(6):41-43.
- [13] 刘传正,刘艳辉,温铭生,等. 中国地质灾害气象预警实践:2003—2012[J]. 中国地质灾害与防治学报,2015,26(1):1-8.
- [14] 张雅斌,马晓华,冉令坤,等. 关中地区两次初夏区域性暴雨过程特征分析[J]. 高原气象,2016,35(3):708-725.
- [15] 李玉文,王盘兴,杜继稳,等. 秦巴山区暴雨及其诱发地质灾害的特征分析[J]. 陕西气象,2007(1):21-25.
- [16] 周丹. 秦岭山地地质灾害临界雨量及潜势预报[J]. 陕西气象,2009(2):49-51.
- [17] 唐亚明,薛强,毕俊攀,等. 降雨入渗诱发黄土滑坡的模式及临界值初探[J]. 地质论评,2013,59(1):97-106.
- [18] 李明,高维英,杜继稳. 陕西黄土高原诱发地质灾害降雨临界值研究[J]. 陕西气象,2010(5):1-5.
- [19] 黄森,崔素丽,辛鹏,等. 天水市“7·25”群发性浅层滑坡降雨阈值及空间分布研究[J]. 自然灾害学报,2021,30(3):181-190.
- [20] 黄森. 天水市“7·25”群发性降雨滑坡灾害预警模型研究[D]. 西安:西北大学,2021.
- [21] 孙炜锋,谭成轩,王继明,等. 陕西宝鸡地区千阳县地质灾害易发性评价[J]. 地质通报,2008,27(11):1846-1853.
- [22] 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.
- [23] 孟庆华,孙炜锋,王涛. 陕西凤县地质灾害易发性评价研究[J]. 工程地质学报,2011,19(3):388-396.
- [24] 石玲,王涛,辛鹏. 宝鸡市地质灾害基本类型和空间分布[J]. 地质通报,2013,32(12):1984-1992.
- [25] 吴树仁,王涛,石菊松,等. 陕西宝鸡地区地质灾害综合研究[M]. 北京:地质出版社,2016:P72.