

文章编号: 2096-1618(2020)06-0697-07

基于概率分布的达州市地质灾害发生频次与降水量级的关系

罗贵东¹, 于竹娟¹, 张 驹²

(1. 四川省达州市气象台, 四川 达州 635000; 2. 四川省成都市气象台, 四川 成都 610000)

摘要:为提高达州市地质灾害预报预警能力,基于由衰减系数计算的有效雨量,对2007–2017年达州市发生的降雨型地质灾害在不同量级雨量下的分布频次进行分析,得到不同量级降水地质灾害发生频次。结果表明:(1)在不同量级降水下地质灾害分布没有明显的规律,但是如果结合不同量级降水出现的概率分析地质灾害的分布情况,地质灾害发生频次与降水呈指数关系。(2)结合达州实际情况和地质灾害预报工作经验,定义了不同地质灾害发生频次的地质灾害气象风险等级,基于指数方程分别计算一到五级地质灾害气象风险等级对应的有效降雨量阈值。(3)经过回代检验和实际应用,雨量阈值得到了较好的验证,能够有效地指导地质灾害气象风险等级预报预警。

关键词:气象学;地质灾害;降水;雨量阈值;达州市;概率区间分布

中图分类号:P426.6

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.06.017

0 引言

达州市位于大巴山弧形构造中段的南侧与川东新华夏系构造的复合交接部位,地势东北高(大巴山区),西南低(盆地丘陵区)。大巴山横直在北部,明月山、铜锣山、华釜山由北而南,纵卧其间,将全市分割为山区、丘陵、平坝3块。山区占面积70.70%,丘陵占28.10%,平坝占1.20%^[1]。北部山体陡峭;中南部较平缓,形成平行谷岭地貌单元(图1)。复杂的地形、地貌为地质灾害的形成提供了动力和能量转化条件。截至2019年5月13日,达州市已查明的地质灾害隐患点共1330处,分布于全市293个乡镇。

达州地质灾害多发易发,除了与本身地质构造特点有关外,还与降水、工程活动等自然条件有关^[2–11]。大量研究表明^[12–17],地质灾害与降水的时空分布有着密切联系,降雨强度越大,地质灾害越容易发生。近年来,不少学者基于降雨强度、降雨持续时间、累计降雨量等的分析,开展地质灾害预警预报和风险评价的研究^[18–31]。

地质灾害的发生本身具有不确定,除了降水以外,还受地质条件等因素影响,而且地质灾害也不一定都能记录。另外虽然较前人的研究增加了区域自动气象站的降水资料,站点更加密集,降雨量的代表性更强,但仍可能由于站点故障,距离稍远等原因,不能完全代表灾害发生地的实际降雨量。近年来对不确定性事件进行概率分析并建立概率预测模型已在各行各业得到

了广泛的应用^[32–40]。主要分析达州市地质灾害与降水的关系,从而为达州地质灾害风险预警预报提供更加科学的支撑。

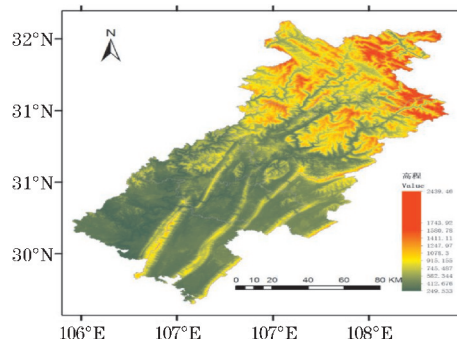


图1 达州市地形图

1 资料与方法

1.1 资料

地质灾害资料来源于2007–2017年达州市地质灾害灾情报表(由达州市地质环境监测站提供),灾害发生位置精确到村组,包括滑坡、泥石流、危岩崩塌、地面塌陷、地面裂缝等共计1233条灾情,剔除掉人为和地震等原因造成的地质灾害,主要由降水等自然原因引发的地质灾害共有1215条。

降雨量资料为2007–2017年达州市下辖所有国家气象站和区域自动气象站的日降雨量(地质灾害发生前当天、前1天、前2天、前3天、前4天、前5天)。所有

滑坡发生点降雨量取离它最近的气象站数据,如果该站数据有误或缺失,再按就近原则选其他站点雨量。

1.2 方法

1.2.1 有效雨量的计算

对达州地质灾害有明显影响的降雨绝大部分出现在地质灾害发生前 5 天内,因此主要分析灾害发生前 5 天和灾害发生当天的降雨量及累积雨量与地质灾害的关系。根据石兴琼等^[19]的研究,有效雨量公式为

$$R_n = \sum_{i=0}^n 0.8^i R_i$$

式中 R_n 为灾害发生前 n 天有效雨量; R_i 为灾害发生前第 i 天的雨量, 0.8^i 为第 i 天的雨量衰减系数,灾害发生当天 $i=0$,灾害发生前一天 $i=1,2,3,\cdots,n$ 。

1.2.2 概率分布密度计算

概率分布密度可按式(2) 计算得出

$$q_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{|x_i - u_j|}{\Delta}, & |x_i - u_j| \leq \Delta \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式中: q_{ij} 是第 i 个指数值在第 j 个等级的概率; $x_i(i=1,2,3,\cdots,n)$ 是样本组中的第 i 个样本值; u_j 是某个等级区间的中点值; $\Delta=u_j-u_{j-1},(j=2,3,\cdots,m)$ 是分配区间长度; m 为等级个数,而 $\frac{q_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n q_{ij}}$ 则为第 i 个指数值在第 j 个等级的概率。

2 分析结果

2.1 降雨量总体分布特征

表 1 达州市地质灾害发生时降雨量分布情况

	当天		前 1 天		前 2 天		前 3 天		前 4 天		前 5 天	
	当天雨量	有效雨量	当天雨量	有效雨量	当天雨量	有效雨量	当天雨量	有效雨量	当天雨量	有效雨量	当天雨量	有效雨量
平均雨量	122.6	122.6	61.0	171.4	13.7	180.1	18.4	189.5	18.6	197.1	5.4	198.9
最小雨量	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
最大雨量	340.3	340.3	268.7	471.1	219.7	473.6	190.6	473.9	219.7	499.2	248.2	499.3

表 2 达州市两次特大型滑坡降雨量分布情况

	逐日降雨量						有效雨量						累积雨量
	D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	
岩门村	163.6	48	18.3	13.1	1.3	0	163.6	202	213.7	220.4	221	221	244.3
土地垭	104.6	51.8	0	0	0	3.5	104.6	146	146	146	146	147.2	159.9

2.2 降雨量区间概率数的计算

基于 1215 个地质灾害计算降雨量区间概率。分析地质灾害记录和地质灾害发生前 0~5 天有效降雨

从发生地质灾害发生个例的降雨量总体来看(表 1),地质灾害当天雨量对地质灾害敏感性最好,发生地质灾害当天平均雨量达 122.6 mm;其次是前 1 天雨量平均为 61 mm;而前 2 天到前 5 天敏感性相对较差,平均雨量分别为 13.7 mm、18.4 mm、18.6 mm 和 5.4 mm。从地质灾害发生前的平均有效雨量来看也是对当天和前一天的雨量最为敏感, R_0 (地质灾害当天有效雨量)为 122.6 mm, R_1 为(地质灾害当天和前一天有效雨量)171.4 mm,前 2 天到前 5 天累积雨量的增幅显著减小分别为 180.1 mm、189.5 mm、197.1 mm、198.9 mm,有效雨量每一天的增幅都在 10 mm 以内。可以看出诱发达州地质灾害的强降雨主要发生在地质灾害前一天和地质灾害发生当天。

2007~2017 年达州市发生了两次特大型滑坡,一次发生在 2007 年 7 月 6 日达县青宁乡岩门村,一次发生在 2007 年 7 月 18 日达县南外镇嘎云村 9 社土地垭。两次地质灾害发生当天均为大暴雨,降雨量分别为 163.6 mm 和 104.6 mm,前一天降雨量分别为 48 mm 和 51.8 mm。第一次灾害前 2~4 天均有降水,雨量不大,为小到中雨,第 5 天无雨;第二次灾害前 2~4 天无降雨,前 5 天出现小雨。从这 2 次典型的滑坡来看(表 2),对地质灾害发生影响最为显著的是当天降雨量,其次是前一天的降雨量,前 2~5 天雨量的作用相对较小。

因此,地质灾害气象风险等级预报要格外关注预报日当天雨量和未来一天雨量预报。目前达州市气象局和达州市自然资源局联合发布的地质灾害气象风险等级预报就缺少预报日当天白天降水,而这期间的降水对地质灾害的发生起着至关重要的作用,需要在下一步工作中加以改进。

量,得出降雨量与滑坡的相互关系,找出各时间尺度降雨量的分布区间,可得出临界降雨量指标。

取 $m=20, \Delta=20$,即 20 mm 为一个小区间,分别计算 20 个小区间的概率,0~5 天有效降雨量的概率分

布情况见图 2。地质灾害当天的有效降雨量分布在 0~340.3 mm (R_0), 为主、次峰型分布, 主峰在 0~20 mm, 分布概率为 20%, 次峰在 180~200 mm, 分布概率为 12.3%。地质灾害前 1 天的有效降雨量分布在 0~471.1 mm (R_1), 为双峰型分布, 分布在两头, 0~20 mm 分布概率为 11.9%, 380 mm 以上分布概率为 12.9%。地质灾害前 2 天的有效降雨量分布在 0~473.6 mm (R_2), 380 mm 以上为峰值, 分布概率为 12.9%, 0~200 mm 概率分布呈波动趋势, 180~200 mm 最高, 分布概率为 9.1%, 200~380 mm 呈下降趋势。地质灾害前 3 天的有效降雨量分布在 0~473.9 mm (R_3), 380 mm 以上为峰值, 分布概率为 12.9%, 0~200 mm 概率分布呈波动趋势, 180~200 mm 最高, 分布概率为 9.5%, 200~380 mm 呈下降趋势。地质灾害前 4 天的有效降雨量分布在 0~499.2 mm (R_4), 380 mm 以上为峰值, 分布概率为 13.6%, 0~160 mm 概率分布呈波动趋势, 140~160 mm 最高, 分布概率为 8.2%, 160~380 mm 呈下降趋势。地质灾害前 5 天的有效降雨量分布在 0~499.3 mm (R_5), 380 mm 以上为峰值, 分布概率为 13.6%, 0~160 mm 概率分布呈波动趋势, 140~160 mm 最高, 分布概率为 8.6%, 160~380 mm 呈下降趋势。

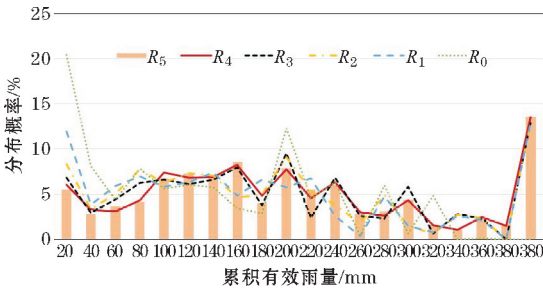


图 2 地质灾害发生前 0~5 天累积有效降雨量概率分布图

以上研究了有地质灾害情况下的降雨量分布概率, 没有结合不同量级的降水概率进行分析, 把不同量级降水地质灾害的个数除以该量级降水 (2007~2017 年达州市 6 个国家气象站平均雨量, 雨量间隔为 10 mm) 出现的天数, 得到不同降雨量级下每天可能发生的地质灾害个数。从图 3 可以看出, 不同时长的有效降水产生地质灾害的临界雨量不同。 R_0 小于 30 mm 时, 地质灾害发生频次小于 1 个/天; 30~60 mm 时, 1~2 个/天; 60~110 mm 时, 5~10 个/天; 大于 110 mm 时, 由于 170~180 mm 降水概率为 0, 所以计算出次数为零 (如果用线性内插将超过 100 个/天), 130~140 mm 为 10 次/天, 其余量级均大于 20 个/天。

R_1 小于 60 mm 时, 地质灾害发生频次小于 1 个/天; 60~90 mm 时, 1~3 个/天; 90~120 mm 时, 5~10 个/天; 大于 130 mm 时, 均大于 15 次/天。 R_2 小于 60 mm 时, 地质灾害发生频次小于 1 个/天; 60~110 mm 时, 1~5 个/天; 110~120 mm 时, 5~10 个/天; 大于 130 mm 时, 均大于 10 次/天。 R_3 小于 60 mm 时, 地质灾害发生频次小于 1 个/天; 60~110 mm 时, 1~5 个/天; 110~130 mm 时, 5~10 个/天; 大于 130 mm 时, 除 150~160 mm 为 6.75 外, 其余量级均大于 10 次/天。 R_4 小于 70 mm 时, 地质灾害发生频次小于 1 个/天; 70~110 mm 时, 1~5 个/天; 110~140 mm 时, 5~10 个/天; 大于 140 mm 时, 除 150~160 mm 为 8.80 外, 其余量级均大于 15 次/天。 R_5 小于 70 mm 时, 地质灾害发生频次小于 1 个/天; 70~110 mm 时, 1~5 个/天; 110~140 mm 时, 5~10 个/天; 大于 140 mm 时, 除 150~160 mm 为 8.63 外, 其余量级均大于 10 次/天。

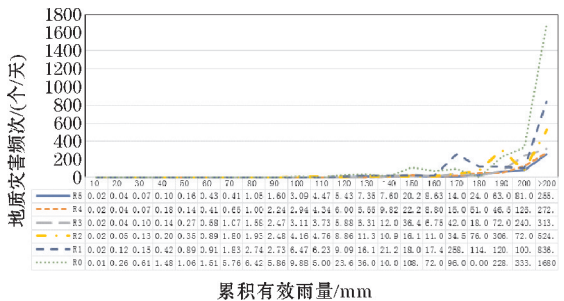


图 3 不同降水量级地质灾害发生频次

2.3 地质灾害风险等级阈值的确定

2.3.1 建立地质灾害发生频率与降雨量关系方程

从图 4 可以看出, 地质灾害出现频次和降雨量的关系曲线大致近似于指数函数。因此, 对 $R_0 \sim R_5$ 用指数函数分别进行拟合, 结果显示, 所有指数曲线方程均通过了 0.001 显著性水平检验, 拟合效果非常好, 见图 4。 $R_0 \sim R_5$ 地质灾害发生频率与降雨量对应的指数方程分别为:

$$R_0: y=0.1078e^{0.042x}$$

$$R_1: y=0.0539e^{0.0425x}$$

$$R_2: y=0.0375e^{0.0425x}$$

$$R_3: y=0.0308e^{0.042x}$$

$$R_4: y=0.0261e^{0.0419x}$$

$$R_5: y=0.0258e^{0.0411x}$$

式中 x 分别为地质灾害发生当天到前 5 天累积有效雨量, y 为地质灾害可能出现的次数。

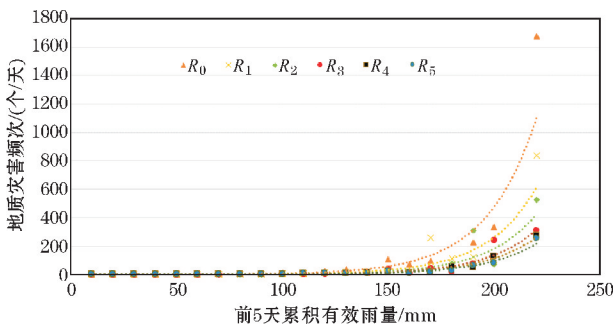


图 4 地质灾害发生频次与 $R_0 \sim R_5$ 指数曲线拟合图

表 3 达州市地质灾害气象风险等级雨量阈值

地质灾害气象风险等级	R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
五级	≤ 23	≤ 39	≤ 48	≤ 53	≤ 57	≤ 59
四级	24 ~ 52	40 ~ 68	49 ~ 77	54 ~ 82	58 ~ 86	60 ~ 88
三级	53 ~ 91	69 ~ 106	78 ~ 115	83 ~ 121	87 ~ 125	89 ~ 128
二级	92 ~ 124	107 ~ 139	116 ~ 147	122 ~ 154	126 ~ 158	129 ~ 161
一级	≥ 125	≥ 140	$\geq 148\text{mm}$	$\geq 155\text{mm}$	≥ 159	≥ 162

为综合不同降水持续时间对地质灾害产生的作用,在确定地质灾害风险等级时,以 $R_0 \sim R_5$ 计算出的 6 个地质灾害风险等级结果中最高等级作为最终的地址灾害风险等级。巧合的是,从 R_0 值来看降水量阈值和气象标准定义的 24 h 雨量量级阈值很接近,大雨以下对应地质灾害气象风险较低;大雨对应四级地质灾害气象风险等级;暴雨对应三级地质灾害气象风险等级;大暴雨以上对应二级和一级地质灾害气象风险等级。

例如,预报日前 1~4 天(地质灾害发生前 2~5 天),雨量分别为 10 mm、0 mm、20 mm、50 mm,预报日当天雨量为 30 mm(地质灾害发生前 1 天),预报未来 1 天(地质灾害发生当天)雨量为 50 mm。根据有效雨量公式分别计算出: $R_0 = 50$ 、 $R_1 = 74$ 、 $R_2 = 80$ 、 $R_3 = 80$ 、 $R_4 = 89$ 、 $R_5 = 105$,根据计算出的 $R_0 \sim R_5$ 累积有效雨量

2.3.2 地质灾害气象风险等级雨量阈值

结合达州实际情况和地质灾害预报工作经验,根据地质灾害发生频率,将地质灾害频次 $y < 0.3$ 定为发生地质灾害风险较低,五级; $0.3 \leq y < 1$ 定为发生地质灾害有一定风险,四级; $1 \leq y < 5$ 定为发生地质灾害的风险较高,三级; $5 \leq y < 20$ 定为发生地质灾害的风险高,二级; $y \geq 20$ 定为发生地质灾害的风险较很高,一级。气象风险预警各等级雨量阈值见表 3(雨量四舍五入取整)。

和雨量阈值,得出地质灾害气象风险等级分别为:四级、三级、三级、三级、三级,确定最后地质灾害气象风险等级为三级。

2.4 地质灾害雨量阈值检验

2.4.1 2007–2017 年地质灾害回代检验

对 2007–2017 年的 1215 个地质灾害进行回代检验,地质灾害气象风险等级在三級以上的概括率为 82.1%,即 997 个地质灾害出现在雨量阈值预报地质灾害气象风险等级在三級以上,218 个出现在雨量阈值预报地质灾害气象风险等级在三級以下。不同时间段有效雨量预报的地质灾害气象风险等级具体情况见表 4。可以看出 $R_0 \sim R_5$ 有效降雨量降水累积时间越长三級以上地质灾害气象风险等级对地质灾害历史个例的概括率越高, R_0 最低为 68.81%, R_5 最高为 81.98%。

表 4 不同时间段有效雨量预报的地质灾害气象风险等级分布情况

地质灾害气象 风险等级	R_0		R_1		R_2		R_3		R_4		R_5	
	个数	比例/%	个数	比例/%	个数	比例/%	个数	比例/%	个数	比例/%	个数	比例/%
五级	259	21.32	192	15.80	164	13.50	151	12.43	150	12.35	144	11.85
四级	120	9.88	102	8.40	113	9.30	107	8.81	78	6.42	74	6.17
三级	160	13.17	142	11.69	142	11.69	158	13.00	171	14.07	194	15.97
二级	145	11.93	151	12.43	158	13.00	154	12.67	161	13.25	150	12.35
一级	531	43.70	628	51.69	638	52.51	645	53.09	655	53.91	652	53.66
三級以上	836	68.81	921	75.80	938	77.20	957	78.77	987	81.23	996	81.98

自然资源部门把地质灾害按照人员伤亡、经济损失的大小分特大型、大型、中型和小型 4 个等级^[41]。2007–2017 年 1215 个地质灾害中特大型 2 个、大型 16 个、中型 122 个、小型 1075 个。对这些地质灾害按分等级进行效果检验,结果见表 5。可以看到,随着地质灾害等级的降低,三級以上地质灾害气象风险等级的概括率在逐渐降

低,由特大型的 100% 降到小型的 84.28%,一级地质灾害气象风险等级也由 100% 降到了 55.63%,说明地质灾害大小与地质灾害气象风险等级存在正相关,地质灾害气象风险等级越高造成的灾害也越严重。两次特大型滑坡发生时的地质灾害气象风险等级均达到了一级。16 次大型地质灾害中有 12 次地质灾害气象风险等级为一级,占

比为75% ,2 次 3 级,2 次五级,三级以上占比87.5%。122 次小型地质灾害中有 70 次地质灾害气象风险等级为一级,占比为57.38% ,20 次二级,14 次三级,三级以上比例85.25%。1075 次小型地质灾害中有 598 次地质灾害气象风险等级为一级,占比为55.63% ,159 次二级,149 次三级,三级以上比例84.28%。

表 5 不同地质灾害等级下地质灾害气象风险等级预报分布情况

地质灾害气象 风险等级	特大型		大型		中型		小型	
	个数	比例/%	个数	比例/%	个数	比例/%	个数	比例/%
五级	0	0.00	2	12.50	12	9.84	99	9.21
四级	0	0.00	0	0.00	6	4.92	70	6.51
三级	0	0.00	2	12.50	14	11.48	149	13.86
二级	0	0.00	0	0.00	20	16.39	159	14.79
一级	2	100.00	12	75.00	70	57.38	598	55.63
三级以上	2	100.00	14	87.50	104	85.25	906	84.28

2.4.2 2018 年地质灾害雨量阈值检验

2018 年达州市未出现区域性大暴雨,地质灾害灾情相对较少,地质灾害风险气象等级总体较常年偏低,下面选取了 5 月下旬和 7 月上旬 2 次强降雨过程进行分析检验。

2018 年 5 月 21–22 日达州市出现强降雨,5 月 21–25 日万源永宁乡(5 月 21 日)、长石乡(5 月 25 日)发生滑坡均导致道路交通中断,其中长石乡龙王沟村苦桥垭组滑坡体积达到 130 万 m³,经济损失 260 万,导致 G347 国道中断,6 户群众房屋全部垮塌,受威胁

群众 70 人,受影响群众 41 户 138 人。宣汉龙泉乡(5 月 23 日)发生崩塌,渠县鲜渡镇(5 月 23 日)。地质灾害发生前 5 天内均出现了暴雨以上量级的降雨(表 6),特别是 21 日万源永宁乡雨量达到 195 mm。按照 $R_0 \sim R_5$ 有效降雨量和地质灾害气象风险等级雨量阈值计算出的 4 个地方地质灾害气象风险等级分别为一级、四级、四级和三级。长石乡在地质灾害气象风险等级为四级的情况下出现了中型滑坡,根据上报的成因说明,除了降雨外还受到认为工程开挖边坡的影响。

表 6 2018 年 5 月下旬达州地质灾害点所在乡镇自动气象站降雨量(20–20 时) 单位:mm

降雨时间	当天	前 1 天	前 2 天	前 3 天	前 4 天	前 5 天	R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	地质灾害气象风险等级
永宁	195	0	0.6	10.6	0	0	195	195	195	201	201	201	一级
长石	40.6	2.1	0	17.8	67.6	0	41	42	42	51	79	79	四级
龙泉	0	50.7	4.4	5	0.2	7	0	41	43	46	46	48	四级
鲜渡	0.2	114.5	0	0	0.1	0	0	92	92	92	92	92	三级

2018 年 7 月 3–4 日达州市出现强降雨,只在 7 月 4 日万源市竹峪镇出现了 1 起小型地质灾害,7 月 4–5 日分别在万源市草坝镇(3 起)、达川区洛车乡(2 起)和石板镇(1 起)、通川区青宁乡(2 起)发现了 8 起地质灾害

险情。地质灾害发生前 5 天内降雨见表 7。发生地质灾害的万源市竹峪镇地质灾害气象风险等级为三级。8 起地质灾害险情中有 3 起地质灾害气象风险等级为三级,5 起地质灾害气象风险等级为五级。

表 7 2018 年 7 月上旬达州地质灾害点所在乡镇自动气象站降雨量(20–20 时) 单位:mm

降雨时间	当天	前 1 天	前 2 天	前 3 天	前 4 天	前 5 天	R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	地质灾害气象风险等级
竹峪(7.4)	65.8	15.1	0.3	0	26.3	0.1	66	78	78	78	89	89	三级
草坝(7.4)	78.2	17	0	6.7	14.6	0.1	78	92	92	95	101	101	三级
洛车(7.4)	11.5	25.5	0.1	0.2	22.2	0	12	32	32	32	41	41	五级
洛车(7.5)	8.4	11.5	25.5	0.1	0.2	22.2	8	18	34	34	34	41	五级
石板(7.5)	17.1	17.4	20.3	0	16.1	14	17	31	44	44	51	55	五级
青宁(7.5)	2.2	45.6	30.3	0.2	1.9	5.1	2	39	58	58	59	61	四级

3 结论和讨论

基于由衰减系数计算的有效雨量,对 2007–2017

年达州市发生的降雨型地质灾害在不同量级雨量下的分布频率进行了分析,结合不同量级降水发生概率,分析了地质灾害发生频次和降水量级的关系,确定不同地质灾害气象风险等级的临界致灾雨量,主要得出以

下结论:

(1)在不同量级降水下地质灾害分布没有明显的规律,但是如果结合不同量级降水出现的概率来分析地质灾害在不同量级下降水下的分布情况,可以看出地质灾害发生频次与降水呈指数关系。利用指数函数拟合地质灾害发生频次与 $R_0 \sim R_5$ 有效雨量的关系,均通过了0.001显著性水平检验,拟合效果非常好。

(2)结合达州实际情况和地质灾害预报工作经验,分别定义了不同地质灾害发生频次的地质灾害气象风险等级。基于指数方程分别计算出了一到五级地质灾害气象风险等级对应的 $R_0 \sim R_5$ 有效降雨量阈值。地质灾害风险等级由 $R_0 \sim R_5$ 有效雨量计算出的最高等级来确定。

(3)地质灾害气象风险等级雨量阈值经过2007–2017年回代检验和2018年地质灾害的检验,雨量阈值都得到了较好的验证,能够有效地指导地质灾害气象风险等级预报预警工作。

致谢:感谢达州市科技计划项目(17YYJC003)对本文的资助

参考文献:

- [1] 刘德兵,竺福春,田莹莹.达州市地质灾害的时空分布特征及成因分析[J].四川地质学报,2014,34(增刊):31–35.
- [2] Weiguo Jiang, Pingzeng Rao, Ran Cao, et al. Comparative evaluation of geological disaster susceptibility using multi-regression methods and spatial accuracy validation[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(4):439–462.
- [3] Chen Jiangang, Chen Xiaoqing, Chen Huayong, et al. Characteristics of viscous debris flow in a drainage channel with an energy dissipation structure[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(2):223–233.
- [4] Huang Yu, Cheng Hualin. The impact of climate change on coastal geological disasters in southeastern China[J]. Natural Hazards, 2013, 65(1):377–390.
- [5] Chen Jiangang, Chen Xiaoqing, Wang Tao, et al. Types and causes of debris flow damage to drainage channels in the Wenchuan earthquake area[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(6):1406–1419.
- [6] Gabriele Amato, Clemens Eisank, Daniela Castro-Camilo, et al. Accounting for covariate distributions in slope-unit-based landslide susceptibility models. A case study in the alpine environment[J]. Engineering Geology, 2019, 260:462–466.
- [7] Jean Baptiste Nsengiyumva, Geping Luo, Lamek Nahayo, et al. Landslide Susceptibility Assessment Using Spatial Multi-Criteria Evaluation Model in Rwanda[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(2):85–90.
- [8] Xu Zhengqi, Tuo Xianguo, Zhang Chengjiang. Environmental geology problems caused by mining activities in Panzhihua iron mine[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2006, 25(1):36–37.
- [9] 林小红,刘爱鸣,徐霞.福建省地质灾害与短时强降水的关系研究[J].福建地质,2014,29(增刊1):57–63.
- [10] 魏丽,郑有飞,单九生.暴雨型滑坡灾害预警方法研究评述[J].气象,2005,31(10):3–6.
- [11] 林孝松,郭跃.滑坡与降雨的耦合关系研究[J].灾害学,2001,16(2):87–92.
- [12] 张玉成,杨光华,张玉兴.滑坡的发生与降雨关系的研究[J].灾害学,2007,22(1):82–85.
- [13] 吴红,邵亮,陆登荣.兰州市区地质灾害与暴雨强度[J].旱气象,2005,23(1):63–67.
- [14] 苗爱梅,郝寿昌,武捷,等.山西省诱发地质灾害的气象因素特征分析[J].气象与环境科学,2009,32(1):39–42.
- [15] 王晓明,刘海峰,石大明,等.吉林省东南部山区地质灾害与降水关系分析及气象等级预报[J].吉林气象,2005,23(1):2–5.
- [16] 段旭,陶云,刘建宇,等.云南省不同地质地貌条件下滑坡泥石流与降水的关系[J].气象,2007,33(9):33–39.
- [17] 陈剑,杨志法,李晓.三峡库区滑坡发生概率与降水条件的关系[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):3052–3056.
- [18] 陈静静,姚蓉,文强,等.湖南省降雨型地质灾害致灾雨量阈值分析[J].灾害学,2014,29(2):42–47.
- [19] 石兴琼,肖天贵,房玉洁,等.西南地区不同地质灾害影响区的降水阈值研究[J].高原山地气象研究,2016,36(1):63–67.
- [20] 冯军,尚学军,樊明,等.陇南地质灾害降雨区划及临界雨量研究[J].干旱气象,2006,24(4):20–24.
- [21] 李德心,何思明,朱兴华,等.前期有效降雨对滑坡启动影响分析[J].灾害学,2011,26(3):41–45.
- [22] 吴树仁,金逸民,石菊松,等.滑坡预警判据初步研究——以三峡库区为例[J].吉林大学学报:地球科学版,2004,34(4):596–600.
- [23] 高华喜,殷坤龙.降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J].岩土力学,2007,28(5):1055–1060.

- [24] 吴跃东,向钊,马玲. 安徽省地质灾害气象预警预报研究[J]. 灾害学,2008,23(4):26-29.
- [25] 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.
- [26] 闵颖,胡娟,李超,等. 云南省滑坡泥石流灾害预报预警模型研究[J]. 灾害学,2013,28(4):216-220.
- [27] 潘建华,彭贵芬,彭俊,等. 基于模糊综合评判的汶川8.0级地震重灾区滑坡泥石流气候风险评估[J]. 灾害学,2012,27(1):10-15.
- [28] 万石云,李华宏,胡娟. 云南省滑坡泥石流灾害危险区划[J]. 灾害学,2013,28(2):60-64.
- [29] 齐信,唐川,陈州丰,等. 地质灾害风险评估研究[J]. 自然灾害学报,2012,21(5):33-40.
- [30] Jiang Weiguo, Rao Pingzeng, Cao Ran. Comparative evaluation of geological disaster susceptibility using multi-regression methods and spatial accuracy validation[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017,27(4):439-462.
- [31] Niu Quanfu, Cheng Weiming, Liu Yong, et al. Risk assessment of secondary geological disasters induced by the Yushu earthquake[J]. Journal of Mountain Science, 2012,9(2):232-242.
- [32] 苏有锦,李忠华. 云南地区6级以上强震时间分布特征及其概率预测模型研究[J]. 地震研究,2011,34(1):1-7.
- [33] 钟仪华,徐瑶,王昱. 油田开发指标系统的概率模拟预测[J]. 数学的实践与认识,2011,41(10):80-86.
- [34] 杨新广,陈云翔,费文. 航空装备战斗损伤概率预测模型研究[J]. 数学的实践与认识,2011,41(18):118-122.
- [35] 马获,赵振娟,张金丽. 经皮冠状动脉介入治疗患者术后2年心脏不良事件发生概率预测模型的建立[J]. 护理学报,2013(20).
- [36] 郑炜,张科,汪芳. 概率预测的网络数学模型及其应用[J]. 计算机工程与应用,2009,45(18):59-69.
- [37] 黄崇富. 自然灾害风险评价——理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [38] 彭贵芬,张一平,赵宁坤. 基于信息分配理论的云南干旱风险评估[J]. 气象,2009,35(7):79-86.
- [39] Liu Zhangjun, Guo Shenglian, Guo Jiali, et al. The impact of Three Gorges Reservoir refill operation on water levels in Poyang Lake, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2017,31(4):879-891.
- [40] Zhang Lihua, Pan Baozhi, Shan Gangyi, et al. Probability distribution method based on the triple porosity model to identify the fluid properties of the volcanic reservoir in the Wangfu fault depression by well log[J]. Computational Geosciences, 2017,21(2):241-246.
- [41] 地质灾害防治条例[Z]. 中华人民共和国国务院令 第394号. 2004-3-1.

The Relationship between the Frequency of Geological Disasters and the Precipitation in Dazhou based on Probability Distribution

LUO Guidong¹, YU Zhujuan¹, ZHANG Ju²

(Dazhou meteorological station, Dazhou 635000, China; 2. Chengdu Meteorological Station, Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to improve the prediction and early warning ability of geological disasters in Dazhou, based on the effective rainfall calculated by the attenuation coefficient, the distribution frequency of rainfall-based geological disasters under different rainfall levels from 2007 to 2017 in Dazhou was analyzed, and the occurrence frequency of geological disasters under different precipitation is obtained. The results show that: (1) There is no obvious law in the distribution of geological disasters under different levels of precipitation, but if combined with the probability of different levels of precipitation to analyze the distribution of geological disasters, the frequency of geological disasters can have an exponential relationship with precipitation. (2) Combined with the actual situation of Dazhou and the working experience of geological disaster prediction, the meteorological risk level of geological disaster of different geological disaster occurrence frequency is defined. Based on the exponential equation, the effective rainfall threshold corresponding to the meteorological risk level of geological disaster ranged from 1 to 5 level is calculated. (3) Through the back generation test and practical application, the rainfall threshold has been well verified, which can effectively guide the prediction and early warning of the meteorological risk level of geological disaster.

Keywords: meteorology; geological disaster; precipitation; rainfall threshold; Dazhou city; probability interval distribution