

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.02.007

引用格式:孙丽影,张弘怀,邱昌骏,等.宁波地质灾害影响因子权重的时变性与雨量阈值研究[J].华东地质,2024,45(2):218-227.(SUN L Y, ZHANG H H, QIU C J, et al. Temporal variability of influence factors weights and rainfall thresholds of geological hazards in Ningbo City[J]. East China Geology, 2024, 45(2):218-227.)

宁波地质灾害影响因子权重的时变性与雨量阈值研究

孙丽影¹,张弘怀¹,邱昌骏²,杨珍斌²,张长响²,张斌²,张泰丽³

(1.宁波市自然资源生态修复和海洋管理服务中心,浙江 宁波 315099;

2.宁波谦诺科技有限公司,浙江 宁波 315099;

3.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016)

摘要:降雨是诱发突发地质灾害的关键要素,持续降雨与斜坡各地质环境要素耦合后会发生变形破坏,进而引起地质灾害各影响因子的权重体系发生变化。基于该理论,在降雨阈值研究过程中充分考虑了地质灾害各影响因子权重的时变性,这对精准预警、预报地质灾害具有重要意义。文章针对宁波市4种地质灾害(滑坡、崩塌、坡面泥石流和沟谷泥石流),选取9类影响因子(岩性、坡度等),分析了10个降雨时段(1 h、3 h、6 h等)的权重体系变化特征,提出了不同地质灾害风险防范区红、橙、黄三类预警的预报值。结果表明:4类地质灾害、9类影响因子的权重均在灾害发生前24 h出现明显变化,其中滑坡中坡度和覆盖层厚度、崩塌中坡度和高差、坡面泥石流中坡度和岩性、沟谷泥石流中坡度和高程6类影响因子权重在持续降雨过程中的变化较明显,坡度均呈正向变化,其余影响因子坡度呈反向变化。通过将时变权重与I-D对数法计算的雨量阈值进行对比,发现运用时变权重来计算雨量阈值能较真实地反映预警值,提高了预警的准确率,减少了过度预警的发生。

关键词:地质灾害;权重时变性;加权雨量;阈值;影响因子;浙江宁波

中图分类号:P694

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2024)02-218-10

我国东南沿海地区常年遭受梅汛期及台风暴雨等影响,特定的地质环境条件极易引发滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害,造成严重的人员伤亡及经济损失^[1-2]。降雨是诱发地质灾害的关键要素,降雨诱发地质灾害遭受失稳的临界值也称临界雨量阈值^[3-5]。研究地质灾害的临界雨量阈值对地质灾害的预警预报具有重要的科学指导意义^[6-7]。

目前,国内外学者对临界雨量阈值的研究主要分为两类:一类是基于地质灾害单体形成的机理推导而获得的物理性降雨阈值,另一类是基于降水与地质灾害关系的经验性统计降雨阈值。例如,WILSON R C等^[8]分析了美国亚拉巴马地区

和加利福尼亚地区的地质灾害和降雨关系,认为累积降雨量值达到180 mm时将触发地质灾害;BRAND E W等^[9]采用降雨强度和降雨时间2个指标来研究降雨与地质灾害的关系,发现虽然可以确定短时强降雨与地质灾害的关系,但是当日降雨量在100 mm以下时极不容易诱发地质灾害;陈剑等^[10]利用三峡库区112个地质灾害-降水事件建立了地质灾害-降水数据库,根据三峡库区地形地貌、地质构造和岩性组合等特征,以齐岳山为界,将三峡库区分为A、B两区,认为最大24 h雨强是三峡库区地质灾害诱发的重要影响因子;庄建琦等^[11]基于1980—2010年在西安地区发生的

* 收稿日期:2023-07-25 修订日期:2024-01-16 责任编辑:谭桂丽

基金项目:国家重点研发计划“非显性滑坡隐患高效勘测技术装备研发(编号:2022YFC3003200)”、中国地质调查局“浙江丽水地区灾害地质调查(编号:DD20190648)”和“浙江飞云江流域地质灾害调查(编号:DD20160282)”项目联合资助。

第一作者简介:孙丽影,1988年生,女,工程师,硕士,主要从事地质灾害研究工作。Email:1226475211@qq.com。

通信作者简介:张弘怀,1979年生,男,高级工程师,硕士,主要从事地质灾害防治研究工作。Email:16516771@qq.com。

114 处地质灾害数据,根据当日降雨量和前期有效降雨量分析建立了地质灾害预测模型,分析了影响秦岭、李岭及黄土塬地区地质灾害发生的前期有效降雨天数和递减指数,并结合气象资料计算了这些地区未来地质灾害发生的概率分别为 10%、50%和 90%的临界阈值,通过计算前期有效降雨量和当日降雨量,并根据降水与阈值的关系确定了 4 级预警等级区域。由此可见,前人关于降雨阈值的研究,主要是基于静态成灾指标与降雨阈值的叠加^[12-14],未充分考虑两者的动态变化特征。

宁波市是东南沿海地区受台风暴雨影响严重的典型地区之一,由降雨引发的地质灾害具有代表性。目前,该市已经开展了以乡镇为单位且基于统计分析的 I-D 降雨阈值研究,但由于历史样品数据偏少,离散性较大,因而降雨阈值精度偏低,误报率较高。为此,本文以宁波市历史灾险情数据为样本,开展地质灾害影响因子在降雨过程中对成灾贡献的时变性分析,采用地质环境与气象动态相结合的分析方法,得到不同时段各影响因子的加权雨量,最后根据加权雨量、极值雨量确定临界雨量阈值,并与 I-D 对数法计算的雨量阈值进行了对比。该研究结果对提高地质灾害预警预报精度具有重要的参考意义。

1 研究区概况

1.1 地质概况

宁波市位于我国东海之滨,其地势西南高、北东低,西部为低山丘陵区,北部为平原区,东部以沿海丘陵、平原及岛屿为主。该地区被中生代火山岩大面积覆盖,广泛发育 NNE 向、NE 向、NW 向断裂,其中以 NNE 向断裂最发育^[2]。出露的地层主要为早白垩世火山-沉积岩系,由下往上划分为大爽组、高坞组、西山头组、茶湾组、九里坪组、馆头组、朝川组和方岩组,岩性以凝灰岩类和粉砂岩类为主。

1.2 气象水文概况

宁波市属于亚热带季风气候,温暖湿润,四季分明,雨量充沛。西部山区多年平均年降水量为 1 600~1 800 mm,沿海平原多年平均年降水量为 1 300~1 500 mm,降雨多集中于 5—6 月的梅雨期和 8—10 月的台风期,5—10 月降雨量占全年降雨量的 70%左右。

1.3 地质灾害概况

目前,宁波市共查明已发生的地质灾害 670 处,其中滑坡 288 处、崩塌 313 处、泥石流 69 处。地质灾害以小型土质为主,主要分布在研究区西部和南部的低山丘陵 25°~45°的斜坡区(图 1)。致灾体物质以残坡积土体及易风化的凝灰岩为主,其次为受节理控制的硬质熔结凝灰岩和以凝灰质沉积碎屑岩为主的岩组。

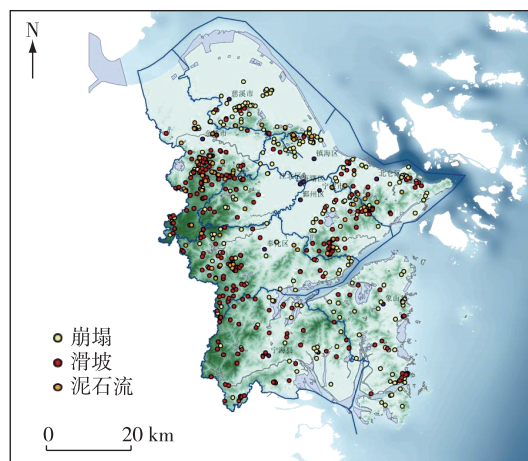


图 1 研究区崩塌、滑坡、泥石流分布示意图

Fig. 1 Distribution of collapses, landslides and debris flows in the study area

2 地质灾害影响因子权重的时变性

2.1 影响因子的选取

宁波市地貌差异大,地质构造发育,岩性复杂,人类活动强烈,在降雨条件下极易引发岩土体失稳,导致发生滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害。因此,以历史地质灾害灾情数据为样本,通过地质环境与地质灾害的相关性分析,选取了岩性、覆盖层厚度、相对高差、斜坡坡度、人工切坡高度、致灾体高程、植被类型、河沟纵坡坡度和流域面积等 9 个因子作为关键影响因子(表 1)。

2.2 影响因子的分时段权重

降雨诱发地质灾害的过程中,各类影响因子对成灾的影响或贡献是不固定的。伴随着降雨的持续,有的影响因子由不活跃变得活跃,有的影响因子由活跃变得更活跃,而有的影响因子则由活跃变为不活跃。例如,覆盖层厚度在强降雨冲刷下会发生持续变化,甚至在降雨结束后,依然会发生变化,但覆盖层厚度在成灾前后对成灾的影响程度差异明显^[15-17]。

表 1 宁波市地质灾害影响因子分类表

Table 1 Classification of the influence factors of geologic hazards in Ningbo City

因子	因子标志	分类数	类别	类别标志	适用灾害类型
岩性	A	6	玄武岩	A1	滑坡 崩塌 坡面泥石流 沟谷泥石流
			火山碎屑岩或火山熔岩	A2	
			侵入岩或潜火山岩	A3	
			层状沉积岩	A4	
			坡积类(残坡积、坡洪积)	A5	
			冲洪积或冲积或洪积类	A6	
覆盖层厚度/m	B	6	<1	B1	滑坡 崩塌 坡面泥石流 沟谷泥石流
			1~3	B2	
			3~6	B3	
			6~12	B4	
			12~25	B5	
			≥25	B6	
斜坡相对高差/m 流域相对高差/m	C	5	<20	C1	滑坡 崩塌 坡面泥石流 沟谷泥石流
			20~50	C2	
			50~100	C3	
			100~300	C4	
			>300	C5	
自然斜坡坡度/° 沟岸山坡坡度/°	D	5	<15	D1	滑坡 崩塌 坡面泥石流 沟谷泥石流
			15~25	D2	
			25~35	D3	
			35~45	D4	
			≥45	D5	
人工切坡高度/m	E	5	<3	E1	滑坡 崩塌
			3~6	E2	
			6~12	E3	
			12~25	E4	
			≥25	E5	
高程/m	F	5	<50	F1	滑坡 崩塌 坡面泥石流 沟谷泥石流
			50~150	F2	
			150~300	F3	
			300~500	F4	
			≥500	F5	
植被类型	G	2	毛竹林	G1	坡面泥石流 沟谷泥石流
			乔木或灌木	G2	
河沟纵坡坡度/°	H	4	<3	H1	沟谷泥石流
			3~6	H2	
			6~12	H3	
			≥12	H4	
流域面积/km ²	K	4	0.2~5	K1	沟谷泥石流
			5~10	K2	
			<0.2 或 10~100	K3	
			>100	K4	

为了描述影响因子在不同时段对地质灾害形成的贡献程度,记 f_{ij} 为第 i 个影响因子第 j 类,其中 $i=1, \dots, m, j=1, \dots, n, t_k$ 为地质灾害发生前的第 k 个时段, $k=1, \dots, s, r_{ijk}$ 为第 i 个影响因子第 j 类在地质灾害发生前第 k 个时段平均最大雨量, R_k 为地质灾害发生前第 k 个时段总平均雨量。

第一步,对 r_{ijk} 作离差和规范化处理:

$$z_{ijk} = (r_{ijk} - R_k) / R_k. \quad (1)$$

第二步,对第 i 个影响因子第 k 个时段,计算 z_{ijk} 的平均值:

$$Z_{ik} = \text{average}(z_{ijk}). \quad (2)$$

第三步,对第 i 个影响因子第 k 个时段,计算

z_{ijk} 的均方差:

$$d_{ik} = \sqrt{\sum((z_{ijk} - Z_{ik})^2)} \quad (3)$$

第四步,计算分时段权重, w_{ik} 即第 i 个影响因子在地质灾害发生前第 k 个时段的权重:

$$w_{ik} = d_{ik} / \sum(d_{ik}) \quad (4)$$

以滑坡为例,统计滑坡发生前 1 h、3 h、6 h、12 h、24 h、36 h、48 h、72 h、120 h 和 168 h 共 10 个时间段的最大降雨量,分别计算 D1、D2、D3、D4 和 D5 共 5 类坡度的每一个时间段的平均最大降雨量,同时计算每一个时间段的总平均降雨量(表 2)。

表 2 根据滑坡坡度因子分类别计算的平均最大降雨量数据表
Table 2 Average of maximum rainfall data for different classifications of landslide slope gradient factors

滑坡类型	平均最大降雨量/mm									
	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h	120 h	168 h
D1	67.34	112.71	182.72	277.74	312.83	341.82	342.22	342.22	342.22	342.22
D2	12.16	39.11	63.78	140.19	198.62	227.21	238.81	241.69	265.83	285.23
D3	9.15	24.50	55.33	102.49	236.05	266.83	282.92	286.08	298.38	313.53
D4	12.31	30.25	50.53	98.49	171.14	216.09	237.69	243.56	247.50	314.58
D5	2.86	3.54	12.82	83.90	286.85	353.17	356.08	360.37	376.99	465.03
总平均雨量/mm	11.86	32.34	61.67	118.51	203.39	231.02	244.59	249.49	269.14	294.84

通过公式(4)计算得到自然斜坡坡度在 10 个时间段的权重(表 3)。伴随着降雨的持续,坡度在滑

坡形成过程中的贡献率由较低水平缓慢升高后快速攀升到较高水平,权重变化趋势如图 2 所示。

表 3 滑坡坡度影响因子分时段权重数据表
Table 3 The weights of landslide slope gradient factors by time period

1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h	120 h	168 h
0.623	0.494	0.439	0.330	0.172	0.165	0.138	0.138	0.137	0.153

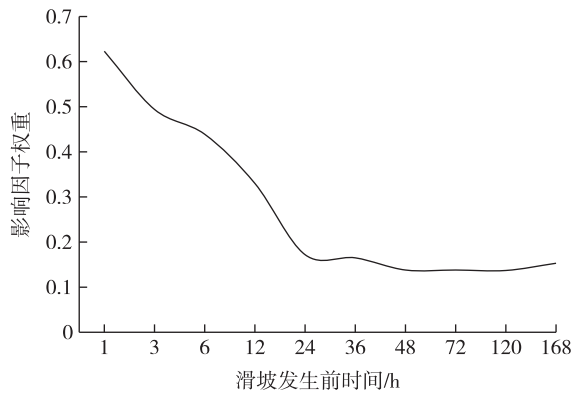


图 2 宁波市滑坡坡度因子权重时变曲线图

Fig. 2 Variation of the weights of the landslide slope gradient factors as a function of time in Ningbo City

2.3 影响因子权重时变性分析

对宁波市滑坡、崩塌、坡面泥石流和沟谷泥石

流 4 类地质灾害的各个影响因子进行分时段权重计算,分别获得相应的权重变化曲线,进而分析各类地质灾害权重的时变性。

2.3.1 滑坡

利用公式(1)、公式(2)、公式(3)和公式(4)计算获得了宁波市滑坡 6 类影响因子的 10 个时段权重(表 4)。影响滑坡的 6 类因子由大到小依次为斜坡坡度、覆盖层厚度、相对高差、切坡高度、岩性和高程。影响滑坡的 6 类因子 10 个时段权重变化曲线图(图 3)显示:坡度和覆盖层厚度的权重在持续降雨过程中变化较明显,坡度贡献率在滑坡发生前 24 h 出现突变,由较低水平 0.172 快速攀升至 0.623;而覆盖层厚度贡献率在滑坡发生前 24 h 出现反向突变,由较高水平 0.308 快速降低至 0.143;其余影响因子均在滑坡发生前 24 h 出现缓慢下降,下降幅度较小。

表 4 滑坡的 6 类影响因子 10 个时段权重数据表

Table 4 The weights of the 6 factors affecting landslides for 10 time periods

因子	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h	120 h	168 h
A	0.076	0.126	0.140	0.126	0.135	0.119	0.122	0.127	0.108	0.051
B	0.140	0.192	0.182	0.238	0.308	0.322	0.342	0.351	0.373	0.350
C	0.060	0.047	0.099	0.126	0.136	0.149	0.153	0.152	0.142	0.140
D	0.623	0.494	0.439	0.330	0.172	0.165	0.138	0.138	0.137	0.153
E	0.067	0.082	0.089	0.119	0.148	0.150	0.149	0.140	0.136	0.196
F	0.034	0.059	0.051	0.061	0.101	0.095	0.096	0.092	0.104	0.110

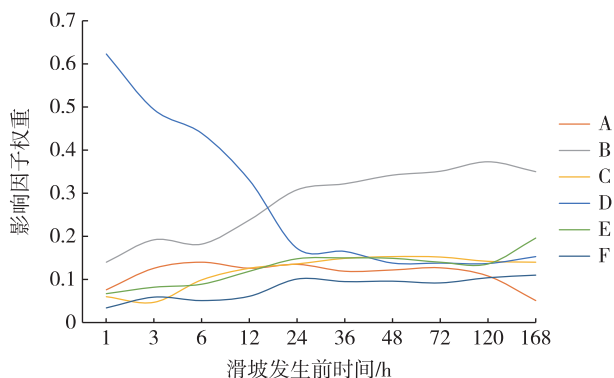


图 3 宁波市滑坡的 6 类影响因子 10 个时段权重变化曲线图

Fig. 3 Variation of the weights of the 6 factors affecting landslides for 10 time periods in Ningbo City

表 5 崩塌的 6 类影响因子 10 个时段权重数据表

Table 5 The weights of the 6 factors affecting collapses for 10 time periods

因子	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h	120 h	168 h
A	0.162	0.116	0.118	0.128	0.099	0.081	0.084	0.083	0.087	0.106
B	0.108	0.124	0.069	0.095	0.087	0.071	0.070	0.066	0.066	0.084
C	0.104	0.106	0.165	0.150	0.074	0.269	0.271	0.285	0.286	0.273
D	0.192	0.245	0.213	0.185	0.149	0.125	0.122	0.121	0.117	0.110
E	0.138	0.183	0.189	0.175	0.212	0.181	0.183	0.184	0.188	0.186
F	0.296	0.226	0.246	0.267	0.379	0.273	0.270	0.261	0.256	0.241

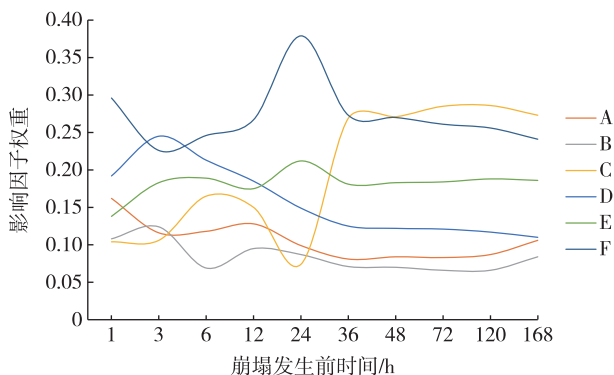


图 4 宁波市崩塌的 6 类影响因子 10 个时段权重变化曲线图

Fig. 4 Variation of the weights of the 6 factors affecting collapses for 10 time periods in Ningbo City

2.3.2 崩塌

利用公式(1)、公式(2)、公式(3)和公式(4)计算获得了宁波市崩塌 6 类影响因子的 10 个时段权重(表 5)。影响崩塌的 6 类因子权重由大到小依次为高程、相对高差、切坡高度、斜坡坡度、岩性和覆盖层厚度。影响崩塌的 6 类因子 10 个时段权重变化曲线图(图 4)显示:持续降雨 36 h 以上,6 类影响因子权重基本保持不变;持续降雨 < 36 h,坡度和高差 2 个影响因子权重在持续降雨过程中变化较明显,坡度贡献率在 36 h 后出现突变,由较低水平 0.125 快速攀升至 0.245,而相对高差贡献率在 36 h 后出现反向突变,由较高水平 0.269 快速降低至 0.104,其余影响因子均在 36 h 后出现缓慢下降,下降幅度较小。

2.3.3 坡面泥石流

利用公式(1)、公式(2)、公式(3)和公式(4)计算获得了宁波市坡面泥石流 6 类影响因子的 10 个时段权重(表 6),影响坡面泥石流 6 类影响因子从大到小依次为岩性、相对高差、高程、覆盖层厚度、斜坡坡度和植被类型。坡面泥石流 6 类影响因子 10 个时段权重变化曲线图(图 5)显示:持续降雨 24 h 以上,6 类影响因子坡度权重基本保持不变;持续降雨 < 24 h,坡度和岩性 2 个影响因子权重在持续降雨过程中变化较明显,岩性贡献率在 24 h 后出现突变,由较低水平 0.152 快速攀升至 0.341,而坡度贡献率在 24 h 后出现反向突变,由较高水平 0.214 快速降低至 0.075,其余影响因子均在 24 h 后出现缓慢下降,下降幅度较小。

表 6 坡面泥石流 6 类影响因子 10 个时段权重数据表

Table 6 The weights of the 6 factors affecting slope debris flows for 10 time periods

因子	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h	120 h	168 h
A	0.341	0.311	0.298	0.297	0.152	0.136	0.129	0.140	0.137	0.139
B	0.216	0.117	0.180	0.081	0.202	0.208	0.215	0.213	0.213	0.208
C	0.180	0.165	0.186	0.119	0.184	0.203	0.220	0.219	0.219	0.224
D	0.075	0.142	0.154	0.248	0.214	0.195	0.192	0.190	0.190	0.188
G	0.008	0.019	0.020	0.052	0.061	0.063	0.058	0.057	0.060	0.063
F	0.180	0.246	0.162	0.203	0.188	0.195	0.185	0.181	0.181	0.179

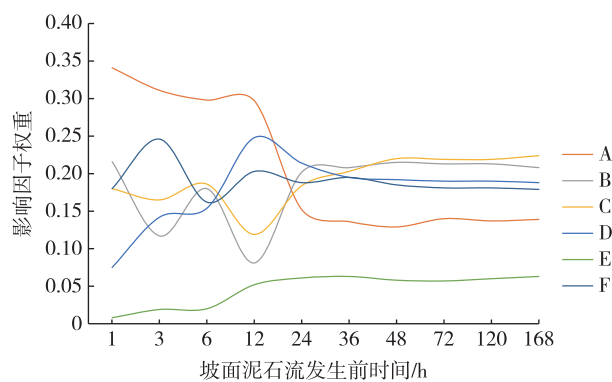


图 5 宁波市坡面泥石流 6 类因子 10 个时段权重变化曲线图

Fig. 5 Variation of the weights of the 6 factors affecting slope debris flows for 10 time periods in Ningbo City

2.3.4 沟谷泥石流

利用公式(1)、公式(2)、公式(3)和公式(4)计算获得了宁波市沟谷泥石流 8 类影响因子的 10 个时段权重(表 7)。沟谷泥石流 8 类影响因子从小到大依次为岩性、高程、斜坡坡度、相对高差、覆盖层厚度、河沟纵坡、植被类型和流域面积。沟谷泥石流 8 类影响因子 10 个时段权重变化曲线图(图 6)显示:持续降雨 24 h 以上,8 类影响因子坡度权重基本保持不变;持续降雨 <24 h,坡度和高程两个影响因子权重在持续降雨过程中变化较明显,岩性贡献率在 24 h 后出现突变,由较低水平 0.277 快速攀升至 0.522,而高程贡献率在 24 h 后出现反向突变,由较高水平 0.230 快速降低至 0.102,其余影响因子均在 24 h 后出现缓慢下降,下降幅度较小。

表 7 沟谷泥石流的 8 类影响因子 10 个时段权重数据表

Table 7 The weights of the 8 factors affecting gully debris flows for 10 time periods

因子	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h	120 h	168 h
A	0.522	0.449	0.384	0.397	0.277	0.231	0.222	0.222	0.233	0.259
B	0.038	0.102	0.118	0.080	0.090	0.107	0.110	0.106	0.091	0.047
C	0.094	0.095	0.065	0.086	0.124	0.113	0.112	0.110	0.112	0.100
D	0.168	0.098	0.109	0.083	0.124	0.115	0.114	0.115	0.121	0.137
G	0.015	0.024	0.037	0.020	0.086	0.084	0.085	0.083	0.081	0.059
F	0.102	0.058	0.108	0.189	0.230	0.249	0.254	0.256	0.244	0.253
H	0.053	0.090	0.143	0.137	0.064	0.075	0.074	0.076	0.080	0.094
K	0.008	0.084	0.035	0.009	0.006	0.025	0.028	0.030	0.037	0.049

3 基于时变权重的雨量阈值

3.1 加权雨量

降雨通过入渗、冲刷等方式改变地质环境条件,相同的雨强遇到不同的地质环境或相同的地质

环境遇到不同的雨强,都会产生不同的风险变化^[17]。为表达这种差异,研究引入加权雨量。加权雨量是基于地质灾害、地质环境因子与降雨的耦合关系得到的综合变量,代表成灾时的降雨期望值。记 v_{ijk} 为第 i 个因子第 j 类在地质灾害发生前第 k 个时段的加权雨量,那么 $v_{ijk} = w_{ik} \times r_{ijk}$ 。

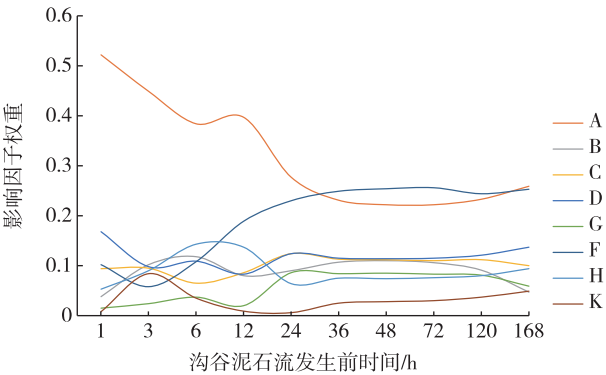


图 6 宁波市沟谷泥石流 8 类影响因子 10 个时段权重变化曲线图

Fig. 6 Variation of the weights of the 8 factors affecting gully debris flows for 10 time periods in Ningbo City

以滑坡的斜坡坡度为例,与表 2 对应的加权雨量如表 8 所示。

3.2 雨量阈值的确定

按照影响因子组合累计各加权雨量,得到可以

作为红色预警的雨量参考阈值。

第一步,确定红色预警的雨量参考阈值 $h_{r0,k} = \text{sum}(vijk)$ 。

第二步,记区内历史最大雨量极值为 $h_{\max}$,确定红色预警的雨量理论阈值 $h_{rl,k}$:

当 $1.2 h_{\max} < h_{r0,k}$ 时, $h_{rl,k} = 0.5(1.2 h_{\max} + h_{r0,k})$;

当 $h_{\max} < h_{r0,k} < 1.2 h_{\max}$ 时, $h_{rl,k} = h_{r0,k}$;

当 $h_{r0,k} < h_{\max}$ 时, $h_{rl,k} = 0.5(h_{\max} + h_{r0,k})$ 。

第三步,确定橙色预警的雨量理论阈值 $h_{ol,k} = 0.8h_{rl,k}$ 。

第四步,确定黄色预警的雨量理论阈值 $h_{yl,k} = 0.6h_{rl,k}$ 。

以编号 330281FF0005 的地质灾害防范区(滑坡)为例,考虑该风险防范区 24 h 预警的雨量阈值,历史 24 h 最大雨量为 376.4 mm,红色预警的雨量参考阈值为 208 mm。通过计算得出,红色预警的雨量理论阈值为 292.2 mm,橙色预警的雨量理论阈值为 233.8 mm,黄色预警的雨量理论阈值为 175.3 mm。宁波市部分风险防范区 24 h 各雨量阈值见表 9。

表 8 滑坡坡度因子分类别加权雨量数据表

Table 8 The weighted rainfall data for the different classifications of landslide slope gradient factors

滑坡类型	加权降雨量/mm									
	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	36 h	48 h	72 h	120 h	168 h
D1	41.888	55.638	80.266	91.550	53.936	56.249	47.367	47.098	47.012	52.279
D2	7.562	19.303	28.016	46.210	34.244	37.389	33.055	33.263	36.518	43.574
D3	5.690	12.093	24.306	33.783	40.697	43.908	39.159	39.372	40.990	47.896
D4	7.655	14.933	22.198	32.465	29.508	35.559	32.899	33.520	34.001	48.056
D5	1.779	1.747	5.632	27.656	49.457	58.117	49.286	49.596	51.789	71.040

表 9 宁波市部分风险区地质灾害雨量阈值(24 h)数据表

Table 9 The geological hazard rainfall threshold (24 h) data of partial risk areas in Ningbo City

风险区编号	$h_{\max}/\text{mm}$	h_{r0}/mm	h_{rl}/mm	h_r/mm	h_{ol}/mm	h_o/mm	h_{yl}/mm	h_y/mm
330281FF0005	376.4	208.0	292.2	292.2	233.8	233.8	175.3	175.3
330281FF0010	336.3	223.5	265.5	265.5	212.4	212.4	159.3	159.3
330211FF0026	233.7	241.7	225.0	225.0	180.0	180.0	135.0	135.0
330203FF0009	404.8	232.9	300.9	300.9	240.7	240.7	180.5	180.5
330203FF0010	416.0	247.2	316.7	316.7	253.4	253.4	190.0	190.0
330226FF0003	294.1	288.9	273.1	245.8	218.5	196.6	163.9	147.5
330281FF0020	361.9	189.9	275.9	275.9	220.7	220.7	165.5	165.5
330225FF0001	270.8	182.6	226.7	226.7	181.4	181.4	136.0	136.0
330225FF0024	215.6	179.1	197.3	197.3	157.8	157.8	118.4	118.4
330283FF0002	343.2	192.1	267.6	240.9	214.1	192.7	160.6	144.5

4 临界雨量阈值对比

经过 2 年的实际运行,发现宁波市前期基于 I-D 对数法获得的临界阈值 6~48 h 临界雨量阈值比较接近实际情况,而 1 h 和 3 h 的临界雨量阈值较实际情况偏小,原因分析如下:

(1) 历史灾害点发生时往往与前期降雨量有关,不考虑前期降雨量而单独分析灾害点的 1 h、3 h

短时降雨量将影响结果的准确性。

(2) 采用同一类型灾害点的每个时段的降雨量平均值作为该时段的代表性降雨量,平均降雨量容易受个别灾害点的低雨量值影响,导致平均降雨量值变低。

以红色预警的临界雨量阈值为例,对比 10 处地质灾害风险防范区 5 个时段的当前阈值和加权雨量阈值。由图 7 可知采用基于时变权重的加权临界雨量阈值后,雨量阈值有不同程度的提升。

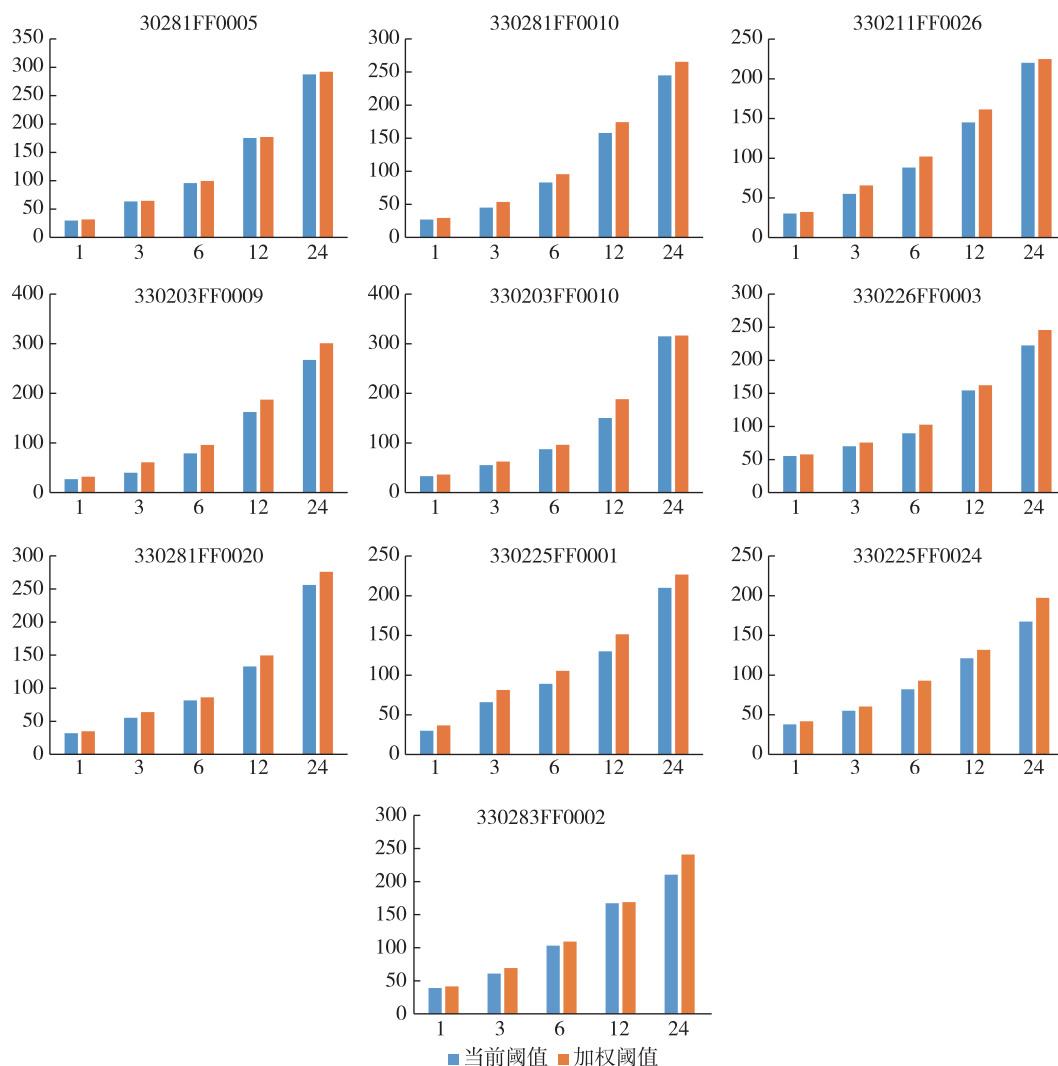


图 7 宁波市 10 处地质灾害风险防范区 6 个时段当前阈值和加权阈值对比图

Fig. 7 Comparison of current and weighted thresholds for 6 time periods in 10 geologic hazard risk prevention areas in Ningbo City

5 结论

(1) 宁波市常年受台风、暴雨等极端天气影响,极易引发地质灾害,降雨和地质环境条件是诱发地

质灾害的关键要素。在地质灾害形成过程中,随着降雨的持续,影响地质环境的各个影响因子与降雨结合后对成灾的贡献是不断变化的。引入分时段权重和加权雨量,提出基于时变权重的雨量阈值获

取方法,对地质灾害精准预警预报具有重要的意义。

(2)通过计算宁波市 4 类地质灾害(滑坡、崩塌、坡面泥石流和沟谷泥石流)的 9 类影响因子分时段权重,获得了相应的权重变化曲线。9 类影响因子权重均在灾害发生前 24 h 出现明显变化,滑坡中坡度和覆盖层厚度、崩塌中坡度和高差、坡面泥石流中坡度和岩性、沟谷泥石流中坡度和高程 6 类影响因子权重在持续降雨过程中变化较明显,坡度一般均呈正向变化,其余影响因子呈反向变化。

(3)在宁波市以往地质灾害风险预警工作中,由 I-D 对数法计算得出的 1 h 和 3 h 雨量阈值相对偏小,造成一些过度预警的情况。以 2022 年全年地质灾害预警数据为例,在应用了基于时变权重的临界雨量阈值后,1 h 和 3 h 预警准确率提高的非常显著,过度预警次数下降 37%。

参考文献

- [1] 张泰丽,孙强,李绍鹏,等.浙江飞云江流域玄武岩残积土滑坡降雨入渗柱状实验研究[J].华东地质,2021,42(4):367-372.
ZHANG T L, SUN Q, LI S P, et al. Columnar experimental study on rainfall infiltration of basalt residual soil landslide in Feiyun River Basin of Zhejiang Province[J]. East China Geology, 2021, 42(4): 367-372.
- [2] 陈有利,崔飞君.宁波地质灾害气象风险预警方法与实践[M].北京:气象出版社,2016.
CHEN Y L, CUI F J. Method and practice of meteorological risk early warning of geological hazards in Ningbo[M]. Beijing: Meteorological Press, 2016.
- [3] KEEFER D K, WILSON R C, MARK R K, et al. Real-time landslide warning during heavy rainfall[J]. Science, 1987, 238(4829): 921-925.
- [4] 姚学祥,徐晶,薛建军,等.基于降水量的全国地质灾害潜势预报模式[J].中国地质灾害与防治学报,2005,16(4):97-102,129.
YAO X X, XU J, XUE J J, et al. A potential forecast model for geological-related disasters based on precipitation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(4): 97-102, 129.
- [5] 赵衡,宋二祥.诱发区域性滑坡的降雨阈值[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(5):1481-1487.
ZHAO H, SONG E X. Rainfall thresholds for regional landslides[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1481-1487.
- [6] 薛群威,刘艳辉,唐灿.突发地质灾害气象预警统计模型与应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(5):1614-1622.
XUE Q W, LIU Y H, TANG C. Early warning statistical model of sudden geological hazards and its application[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(5): 1614-1622.
- [7] 赵卫东,季斌,田剑,等.一种区域地质灾害气象预报预警方法:中国,114093133A[P].2022-02-25.
ZHAO W D, JI B, TIAN J, et al. The invention relates to a meteorological forecasting and early warning method for regional geological hazards: CN, 114093133A[P]. 2022-02-25.
- [8] WILSON R C, KEEFER D K. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 coyote lake, California, earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73(3): 863-877.
- [9] BRAND E W, PREMEHITT J, PHILLIPSON H B. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong[C]//Proc. 4th International Symposium on Landslides. Toronto, Ontario: BITEch Publishers, 1984: 377-384.
- [10] 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.
CHEN J, YANG Z F, LI X. Relationship between landslide probability and rainfall in three gorges reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3052-3056.
- [11] 庄建琦,彭建兵,张利勇.不同降雨条件下黄土高原浅层滑坡危险性预测评价[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(3):867-876.
ZHUANG J Q, PENG J B, ZHANG L Y. Risk assessment and prediction of the shallow landslide at different precipitation in loess plateau[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(3): 867-876.
- [12] 张丽红,张新海,蓝海波,等.基于气象预报的山洪地质灾害预警技术研究[J].人民黄河,2020,42(S1):16-17.
ZHANG L H, ZHANG X H, LAN H B, et al. Research on early warning technology of mountain torrent geological disaster based on meteorological forecast[J]. Yellow River, 2020, 42(S1): 16-17.
- [13] 张凯翔.基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(6):1-11.
ZHANG K X. Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China[J]. The Chinese Journal of Geo-

- logical Hazard and Control, 2020, 31(6): 1-11.
- [14] 孙德亮. 基于机器学习的滑坡易发性区划与降雨诱发滑坡预报预警研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- SUN D L. Mapping landslide susceptibility based on machine learning and forecast warning of landslide induced by rainfall[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [15] 李环禹, 陈朝晖, 范文亮, 等. 区域降雨型滑坡风险分析统计模型研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 103-111.
- LI H Y, CHEN Z H, FAN W L, et al. The statistical risk analysis model of rainfall-induced landslide in large areas[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(4): 103-111.
- [16] 伍剑波, 孙强, 张泰丽, 等. 地形起伏度与滑坡发育的相关性——以丽水市滑坡为例[J]. 华东地质, 2022, 43(2): 235-244.
- WU J B, SUN Q, ZHANG T L, et al. Research for the correlation between relief amplitude and landslides: a case study of Lishui City[J]. East China Geology, 2022, 43(2): 235-244.
- [17] 孙强, 张泰丽, 伍剑波, 等. SHALSTAB 模型在浙南林溪流域滑坡预测中的应用[J]. 华东地质, 2021, 42(4): 383-389.
- SUN Q, ZHANG T L, WU J B, et al. Application of shallow landslide stability model to landslide prediction in the Linxi River basin of southern Zhejiang[J]. East China Geology, 2021, 42(4): 383-389.

Temporal variability of influence factors weights and rainfall thresholds of geological hazards in Ningbo City

SUN Liying¹, ZHANG Honghuai¹, QIU Changjun², YANG Zhenbin², ZHANG Changxiang²,
ZHANG Bin², ZHANG Taili³

(1. Ningbo Centre of Natural Resources Ecological Restoration and Marine Management Service,
Ningbo 315099, Zhejiang, China;

2. Ningbo Qianmu Technology Co., Ltd., Ningbo 315099, Zhejiang, China;

3. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: Rainfall is one of the key inducements of geological hazards. Continuous rainfall coupled with the geological environment elements will lead to the deformation and failure of the slope, which in turn causes the continuous changes in the weighting system of the various influence factors of geological hazards. Therefore, it is of great significance for accurate hazard warning and forecast to fully consider the temporal variability of the influence factors' weights of geological hazards in the research of rainfall threshold. This paper selected nine influence factors (lithology, slope, etc.) for four types of geological hazards including landslides, collapses, slope debris flows and gully debris flows to analyze the changes in the weighting system of ten rainfall periods (1 h, 3 h, 6 h etc.) in Ningbo, and finally put forward three levels (red, orange and yellow) of warning and forecasting value for different geo-hazard risk prevention zones. The results show that the weights of the nine influence factors of the four types of geological hazards change apparently within 24 hours after rainfall. The weights of the six influence factors, including the slope and soil layer thickness of landslides, the slope and elevation difference of collapses, the slope and lithology of slope debris flows, and the slope and elevation of the gully debris flows, change more obviously in the process of rainfall. The weights of slopes are generally positively correlated with time, while the weights of the other factors are negatively correlated with time. Comparing the rainfall thresholds calculated by the method considering the time-varying weights and the I-D logarithmic method, the result indicates that the rainfall thresholds calculated by the former method can reflect more real warning values.

Key words: geological hazards; temporal variability of weights; weighted rainfall; threshold; influence factors; Ningbo, Zhejiang