

Principal Component of Rain Fall or Heavy Rain Fall Induced Debris Flow of Hillslope on Slope Foundations

Haiyan Qin*, Yufen Lei, Bo Yuan

The No. 11 Geology Team of Zhejiang Province, Wenzhou Zhejiang
Email: *429369290@qq.com

Received: Sep. 9th, 2019; accepted: Sep. 22nd, 2019; published: Sep. 29th, 2019

Abstract

High intensity rains in Wenzhou often lead to serious casualties and economic losses caused by debris flow on steep slopes. In this paper, high-intensity rainfall data of debris flow caused by steep slopes in Wenzhou are collected over the years, divided into groups in terms of the maximum rainfall of 24 h, 6 h, 3 h and 1 h, and analyzed by the principal component method. The results show that short duration rainfall intensity (1 h, 3 h) contributes the most to the formation of debris flow on the steep slopes and that antecedent precipitation (6 h, 24 h) has an effect on the formation, but may not be considered as the main factor in the prediction.

Keywords

Rainfall, Debris Flow of Hillslope Principal Component

引发陡斜坡坡面泥石流的高强度降雨主成份分析

秦海燕*, 雷玉芬, 袁波

浙江省第十一地质大队, 浙江 温州
Email: *429369290@qq.com

收稿日期: 2019年9月9日; 录用日期: 2019年9月22日; 发布日期: 2019年9月29日

*通讯作者。

摘要

温州市高强度降雨引发陡斜坡坡面泥石流常造成严重的人员伤亡和经济损失。本文收集了多年来温州市引发陡斜坡坡面泥石流的高强度降雨资料,按最大24 h、6 h、3 h和1 h降雨量进行整理,并采用主成份法对其进行分析研究。结果表明:短历时雨强(1 h、3 h)对陡斜坡坡面泥石流形成贡献最大,前期降雨(6 h、24 h)虽具有一定作用,但在预测时,可不作为主要因素进行考虑。

关键词

降雨, 坡面泥石流主成份

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

温州市地处浙东南沿海,台风形成高强度降雨引发的地质灾害往往给当地带来巨大的生命和财产损失。近20年以来,温州市开展了许多地质灾害调查与研究,对做好地质灾害预警预报,有效消除地质灾害隐患提供了有力的技术保障。但对高强度降雨引发的陡斜坡地质灾害的预防缺乏足够的科学依据,没有建立完善的灾害预防、预警预报体系。

国内外众多学者对斜坡失稳与暴雨的关系进行了大量的研究[1][2][3][4],Caine [5]根据 Campbell [6]关于高强度降雨与浅层滑坡发生关系的认识以及 Starkel [7]通过降雨强度-历时关系判别临界降雨量的工作提出降雨阈值这一概念,并将降雨阈值分为多种类型,其中 I-D 阈值是文献中最常见和应用最多的。麻李长江等[2][8]报导过浙江及6个县(市)引发滑坡和泥石流的 I-D 阈值,对浙江地质灾害的预测预报起到一定的作用,而对高强度降雨引发的陡斜坡地质灾害预测预报有限,其主要原因在于所利用的降雨阈值成份存在缺陷。彭涛[9]利用对降雨引泥石流的降雨主成份进行分析研究,但对引发陡斜坡坡面泥石流的高强度降雨主成份分析少有报道,为进一步做好温州市高强度降雨引发陡斜坡坡面泥石流地质灾害预防工作,有必要对其高强度降雨的主成份进行分析研究。

我国气象部门可以对当前时间之后1 h、3 h和24 h的降雨量进行预报,首先可以根据24 h的降雨量预报来对预报日期的陡斜坡地质灾害的总体发生情况有一个判断,如果超过了降雨量临界值,则立即向相关地区的居民发出预警预报信息;否则接收气象部门的1 h、3 h降雨量预报信息,结合降雨量临界值 I-D 曲线,对最近3 h内以及之后的陡斜坡稳定状态进行判断和预报。本文采用主成份分析法,对高强度降雨引发陡斜坡坡面泥石流的降雨主成份进行分析研究,为温州市预防高强度降雨引发陡斜坡坡面泥石流提供科学依据。

2. 降雨数据来源

2.1. 雨量资料的收集和整理

从温州市水利局、泰顺县气象局、文成县气象局所提供的降雨资料,有降雨量数据雨量站、水位站或水文站共约700多个,其中有经纬度、高程信息雨量站、水位站或水文站共500多个。

对收集的降雨资料,分别按最大 24 h 降雨量、最大 6 h 降雨量、最大 3 h 降雨量和最大 1 h 降雨量进行汇总,并与相对应的坡面泥石流进行整理。

2.2. 降雨量获取

降雨量的获取共有 2 种方法:一是直接采用离坡面泥石流点最近的雨量观测站数据;二是根据区域内部分雨量观测站的数据进行推算,是根据坡面泥石流点距离雨量计的距离进行加权计算的方法来确定没有雨量计地区的雨量数据,具体方法如下所述。

首先,需要根据经纬度信息计算出坡面泥石流点与周围据其最近的三个雨量计的距离,距离计算公式为[3]:

$$S = 2 \times \arcsin \sqrt{\sin^2 \frac{a}{2} + \cos(Lat1) \times \cos(Lat2) \times \sin^2 \frac{b}{2}} \times R \quad (1)$$

式中: S 为两点之间的距离; $Lat1$ 、 $Lat2$ 分别为点 1、点 2 的纬度; a 为两点纬度之差; b 为两点经度之差; R 为地球半径,可以取为 6378.137 km。根据上述公式得到 3 个雨量计与预报地点的距离 S_1 、 S_2 、 S_3 之后,根据加权算法求得坡面泥石流点的降雨量,算式如下[3]:

$$Q = \frac{Q_1 \times S_1 + Q_2 \times S_2 + Q_3}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (2)$$

式中: Q 为预报地点的降雨量; Q_i 为各雨量计的雨量信息; S_i 为第 i 个雨量计距离坡面泥石流点的距离。

3. 陡斜坡坡面泥石流形成的降雨条件主成份分析

3.1. 主成份分析的基本思路

主成份分析,又称主组元分析、主分量分析,就是把多个指标化为少数几个综合指标的一种统计分析方法[10]。在多指标(或变量)的研究中,往往由于变量个数太多,且彼此之间存在着一定的相关性,因而使得所观测的数据在一定程度上有信息的重叠。当变量较多时,在高维空间中研究样本的分布规律就更复杂。其基本思想是要在力保数据信息丢失最小的原则下,对高维空间进行降维处理,即在保证数据信息损失最小的前提下,经线性变换和舍弃一小部分信息,而以少数的综合变量取代原始采用的多维变量,从而达到简化的目的。

3.2. 成份分析的步骤

1) 数据标准化处理[10]

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - \overline{X_j}}{S_j} \quad i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,p \quad (3)$$

式中, Z_{ij} 为标准化后的数据; x_{ij} 为原始数据; $\overline{X_j}$ 为第 j 个变量的均值; S_j 为第 j 个指标的标准差。

2) 计算相关系数矩阵 R

3) 计算特征值和特征向量

求相关矩阵 R 的特征根 λ_j , 并使其按从大到小顺序排列, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$

同时,可得到相应的特征向量:

$$r_1, r_2, \dots, r_n$$

4) 计算贡献率和累积贡献率

一般选取累积贡献率达 80%~90%的特征值作为相应的主成份。

5) 选择主成份个数, 计算主成份得分[10]

$$F_i = r_{1i}X_1 + r_{2i}X_2 + \cdots + r_{pi}X_{pi} \quad i = 1, 2, \cdots p \quad (4)$$

3.3. 坡面泥石流形成的降雨条件综合分析

1) 相关性分析

通过温州市多年强降雨引发陡斜坡坡面泥石流的降雨资料统计, 获得了各项降雨特征值(表 1), 运用主成份分析方法对坡面泥石流形成的降雨条件进行综合分析。根据主成份分析法的原理和步骤, 本次研究选取了高强度降雨条件下陡斜坡发生坡面泥石流的 4 个降雨指标, 即最大 24 h 降雨量、最大 6 h 降雨量、最大 3 h 降雨量和最大 1 h 降雨量作为分析变量, 进行数据处理后, 进行相关性分析, 并对信度和效度进行检验(表 2、表 3)。

Table 1. Summary of statistics on high-intensity rainfall of debris flow on steep slopes

表 1. 多年引发陡斜坡坡面泥石流高强降雨量统计一览表

序号	1 h	3 h	6 h	24 h	序号	1 h	3 h	6 h	24 h
1	119.0	289.5	372.0	410.0	22	62.9	100.2	173.4	364.1
2	117.8	243.3	275.5	314.9	23	54.2	132.7	200.1	363.2
3	137.6	317.8	378.0	404.7	24	69.4	114.2	125.6	186
4	112.9	225.4	276.4	286.2	25	100	242.6	289.2	388
5	106.9	207.2	239.3	245.6	26	93.6	234.4	317.8	390.2
6	122.2	245.4	276.7	286.2	27	81.1	211.8	265.3	394.1
7	70.5	157.5	225.5	540	28	77.8	207.6	269.1	352.2
8	90.5	204	361.5	863.5	29	102	228	289.5	378
9	46	126.5	188.5	426.5	30	92.5	172.5	226	300
10	70.5	151	212.5	313	31	94.6	231.7	293.3	379.3
11	61	140.5	232	359.5	32	60.6	142.1	168.7	230.6
12	105	269	435	586	33	95.5	65	189	396
13	36.2	70.5	139.6	319.8	34	74.5	148.5	198.5	398.5
14	60.1	139	223	532	35	79.5	189.5	225.5	619.5
15	70	172	253.6	430.5	36	87.5	177.5	212.5	449.0
16	71.6	123.6	168.4	526.8	37	80.4	166.5	211.9	461.9
17	90.5	151	254.5	467	38	102.4	195.7	249.3	544.3
18	82	167	235.5	382.5	39	45.5	102.9	158.1	401.1
19	54.2	132.7	200.1	339.7	40	80.4	166.5	211.9	461.9
20	83	142	207.5	264.5	41	40.2	89	119.9	306.3
21	55	115.9	194.5	386.9					

Table 2. Correlation matrix^a
表 2. 相关矩阵^a

系数		最大降雨量			
		1 h	1 h	6 h	24 h
相关	1 h	1.000	0.801	0.683	0.039
	3 h	0.801	1.000	0.795	0.111
	6 h	0.683	0.795	1.000	0.433
	24 h	0.039	0.111	0.433	1.000
Sig.(单侧)	1 h		0.000	0.000	0.406
	3 h	0.000		0.000	0.251
	6 h	0.000	0.000		0.003
	24 h	0.406	0.251	0.003	

^a行列式 = 0.083。

Table 3. Tests by KMO and Bartlett
表 3. KMO 和 Bartlett 的检验

取样足够度的 Kaiser-Meyer-Olkin 度量		0.636
Bartlett 的球形度检验		近似卡方
		df
		Sig.
		89.181
		6.0
		0.000

通过相关分析(表 3)可知: 4 个分析变量之间存在着不同程度的相关性, 各变量之间存在着正相关关系, 其中最大 1 h 雨强与最大 3 h 雨强之间具有高度的正相关关系, 相关系数达 0.801; 根据 KMO (信度) 和 Bartlett (效度) 的检验 Sig 的值小于 0.05, 由此可见, 多数变量之间存在高度的相关关系。因此, 有必要进行主成份分析。

2) 主成份分析

根据特征值大于 1 的原则, 选取两个主成份。由表 4 可知两个主成份的累积贡献率已经达到 90.941%。可以认为前两个主成份已经反映了原变量的基本信息。因为温州地处东南沿海, 雨量充沛, 陡斜坡上的岩土体常年处于饱和或接近饱和状态, 需要较大的短时降雨下, 才可以激发坡面泥石流的发生。由图 1 成分分析碎石图可以更直观的看出当特征值大于 1 时, 有两个主成份。因此, 主要考虑第一、第二主成份对陡斜坡坡面泥石流形成的影响, 已经能够说明问题, 后几个主成份可以略去。

Table 4. List of main component analysis results
表 4. 主成份分析结果一览表

成份	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%
1	2.592	64.807	64.807	2.592	64.807	64.807	2.461	61.514	61.514
2	1.045	26.134	90.941	1.045	26.134	90.941	1.177	29.426	90.941
3	0.228	5.701	96.642						
4	0.134	3.358	100.000						

提取方法: 主成份分析。

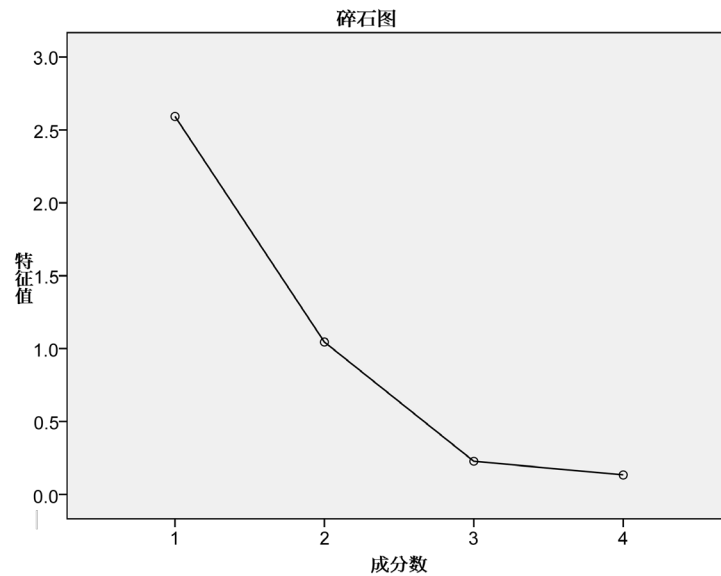


Figure 1. Component analysis crushed stone diagram

图 1. 成分分析碎石图

3) 主成份因子分析

对第一、第二主成份进一步作因子分析，得到旋转成份矩阵(表 5)。

Table 5. Rotation component matrix^a

表 5. 旋转成份矩阵^a

	成份 1	成份 2
最大 1 h 降雨量	0.928	-0.053
最大 3 h 降雨量	0.949	0.060
最大 6 h 降雨量	0.835	0.445
最大 24 h 降雨量	0.053	0.986

提取方法：主成份。
旋转法：具有 Kaiser 标准化的正交旋转法。

^a 旋转在 3 次迭代后收敛。

表 5 表明：在旋转成分矩阵中第一主成份的 1 h 最大降雨量与 3 h 最大降雨量两两交叉值小于 0.1，所以第一成分中保留“6 h 最大降雨量”。同理，第二主成份保留“24 h 最大降雨量”。第一主成份的 1 h 最大降雨量与 3 h 最大降雨量成负相关关系，这表明在第一主成份中，1 h 最大降雨量越大，坡面泥石流所需要的 3 h 最大降雨量就越小，反之亦然，同时也表明坡面泥石流的短历时激发降雨存在一个最低的范围指标。群发性坡面泥石流与 1 h 和 3 h 的关系比较密切，与 24 h 或过程雨量关系不大。

根据主成份的计算公式 4 前 2 个主成份的表达式为：

$$\text{第一主成份: } F1 = 0.928X1 + 0.949X2 + 0.835X3 + 0.053X4 \quad (5)$$

$$\text{第二主成份: } F2 = -0.053X1 + 0.060X2 + 0.445X3 + 0.986X4 \quad (6)$$

在第一主成份的表达式中，第二、三项指标的系数较大，这三个指标起主要作用。因此，我们可把第一主成份看成是主要由 1 h 最大雨强、3 h 最大雨强和 6 h 最大雨强三者组成。在第二主成份中，第一项指标影响最大，远超过其它指标的影响，可单独看成是间接前期降雨的影响。

4) 回归分析

由表 6 表明, 模型汇总 b 的检验 Sig 值小于 0.05, 由此可见, 各模型计算存在高度的相关关系。表 7 表明, 最大 24 h 降雨量系数 a 的检验 Sig 值大于 0.05, 由此可见, 最大 24 h 降雨量对坡面泥石流的形成起到间接作用。

Table 6. Model summary^b
表 6. 模型汇总^b

模型	R	R 方	调整 R 方	标准估计的误差	更改统计量					Durbin-Watson
					R 方更改	F 更改	df1	df2	Sig.F 更改	
1	0.479 ^a	0.230	0.187	3.76098	0.230	5.373	2	36	0.009	0.402

^a 预测变量: (常量), 24 h 最大降雨量, 6 h 最大降雨量。^b 因变量: 时间段。

Table 7. Coefficient^a
表 7. 系数^a

模型	非标准化系数		标准系数		t	Sig.	相关性			共线性统计量	
	B	标准误差	试用版				零阶	偏	部分	容差	VIF
(常量)	13.940	2.557			5.453	0.000					
1 最大 6 h 降雨量	-0.032	0.010	-0.529		-3.260	0.002	-0.451	-0.477	-0.477	0.812	1.231
最大 24 h 降雨量	0.006	0.005	0.179		1.105	0.277	-0.050	0.181	0.162	0.812	1.231

^a 因变量: 时间段。

4. 结论

主成份分析结果表明: 短历时雨强(1 h、3 h)对陡斜坡坡面泥石流形成贡献最大, 前期降雨(6 h、24 h)虽具有一定作用, 但在预测时, 可不作为主要因素进行考虑。也进一步说明高强度降雨引发陡斜坡坡面泥石流是在高强度短历时降雨作用下, 陡斜坡上的松散岩土体快速达到饱和的状态或形成瞬态饱和区。同时, 高强度降雨通过雨滴溅蚀、坡面径流侵蚀和降雨加载等作用加剧陡斜坡的不稳定性。当降雨量达到能够提供足够的激发能量并形成强大的径流时, 陡斜坡上的松散物质通过浅表层顺层滑移、局部崩塌、滑坡的激发下顺坡快速向下流动; 并在水动力作用的带动下通过侵蚀、铲刮、碰撞、剥理解体等方式, 裹挟沿途物质, 从而形成一种含有大量泥沙、石块和巨砾的固、液相流体。这一结果与本调查结果基本吻合。

基金项目

重大防灾治灾项目(温土资[2016]89 号)。

参考文献

- [1] 谢剑明, 刘礼领, 殷坤龙, 等. 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究[J]. 地质科技情报, 2003, 22(4): 101-105.
- [2] 李长江, 麻土华, 李伟, 等. 滑坡频度 - 降雨量的分形关系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1): 87-93.
- [3] 孙鸣雷. 降雨对温州市安埠山滑坡稳定性影响研究[D]: [硕士研究生论文]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- [4] 徐晶, 李伟华. 台风强降雨诱发地质灾害的雨量特征分析[J]. 气象, 2009, 35(8): 42-48.
- [5] Caine, N. (1980) The Rainfall Intensity-Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Anna-*

-
- ler, **62A**, 23-27. <https://doi.org/10.1080/04353676.1980.11879996>
- [6] Campbell, R.H. (1975) Soil Slips, Debris Flows, and Rainstorms in the Santa Monica Mountains and Vicinity, Southern California. In: *US Geological Survey Professional Paper 851*, U.S. Government Printing Office, Washington DC, 51. <https://doi.org/10.3133/pp851>
- [7] Starkel, L. (1979) The Role of Extreme Meteorological Events in the Shaping of Mountain Relief. *Geographica Polonica*, **41**, 13-20.
- [8] 麻士华, 李长江, 孙乐玲, 等. 浙江地区引发滑坡的降雨强度 - 历时关系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(2): 20-25.
- [9] 彭涛. 泥石流形成的降雨条件及其预测预报研究——以重庆市北碚区为例[D]: [硕士论文]. 重庆: 西南大学, 29-32.
- [10] 于秀林, 任雪松. 多元统计分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004: 154-169.