

丁明涛, 周鹏, 庙成, 等. 基于临界水深法的单沟泥石流启动降雨量推算[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 55-59, 63. [DING Mingtao, ZHOU Peng, MIAO Cheng, et al. Calculation of Starting Rainfall for Single Debris Flow Based on Critical Water Depth Method[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 55-59, 63. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.03.011.]

基于临界水深法的单沟泥石流启动降雨量推算*

丁明涛^{1,2}, 周鹏³, 庙成⁴, 黄涛²

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756; 2. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 3. 重庆市彭水苗族土家族自治县水务局, 重庆 409600; 4. 中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要: 以汶川县七盘沟为研究对象, 在高精度遥感影像的支持下, 通过对七盘沟的实地勘察, 收集汇总了七盘沟泥石流的基础数据(松散堆积体属性、泥石流容重等)。应用临界水深法, 结合七盘沟的实际情况, 逆向推求七盘沟泥石流启动的临界降雨量。研究发现: 汶川县七盘沟流域共查明 117 处松散堆积体, 其临界水深介于 0.18~11 m 之间, 松散堆积体的临界启动值为 0.1~6.9 m/s, 启动降雨量处于 0.1~174 mm 之间。本研究结果与七盘沟实际情况基本吻合, 可为单沟泥石流监测和预警预报系统的建设和完善提供一定参数指导。

关键词: 泥石流; 临界水深法; 启动降雨量; 汶川县七盘沟

中图分类号: P333; X43; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)03-0055-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.03.011

我国地域辽阔, 其中山地面积约为 600 万 km², 约占国土面积的 2/3^[1], 且大部分位于西北、西南地区, 这些地区沟壑纵横、地质环境条件复杂、季节性降水差异明显等, 使得区域内泥石流灾害严重^[2], 灾害造成了大量的人员伤亡和经济损失。为了尽可能降低泥石流灾害所造成的损失, 单沟泥石流的监测与短临预警研究已成为泥石流防灾减灾工作的重要内容。

泥石流的预警研究可以分为三个阶段组成:

①初级阶段: 由泥石流防治专家基于对泥石流发生前的相关现象进行科学总结, 进而对泥石流是否发生做出预警, 因此可称为现象预警或经验预警, 但此种方式准确性主要取决于防治专家的经验, 具有主观性过强的缺点; ②中级阶段^[3-5]: 主要采用对泥石流发生时临界雨量定性、定量以及构建相应数据模型的方式, 对泥石流启动进行预警; ③高级阶段^[6-7]: 随着科学技术的不断发展, 人们对泥石流预警时效性、精确率、智能化的要求不断提高, 经过各个学科技术的交叉应用, 目前泥石流短临预警主要为基于监测信息的实时动态预报, 采用的技术手段及相关理论主要有现代数值模拟技术、3S 技术和非线性科学理论。

在泥石流短临预警体系的研究中, 对临界降雨量的预测仍是目前关注的焦点。国内外关于泥石流临界降雨量的分析方法主要有三种: 实证法、频

率计算法和临界水深计算法^[8-10]。其中, 实证法适用于具有长期关于降雨量与泥石流灾害历史数据的区域, 采取的主要手段是通过对相关数据进行启动机理、统计分析后, 获取前期降雨量、临界降雨量与泥石流灾害之间的关系, 并绘制泥石流降雨量阈值曲线; 频率计算法适用于具有丰富降雨量数据, 但缺少泥石流灾害统计数据区域, 采取方法基于一个假设, 即泥石流灾害的发生与暴雨处于同一频率, 因此只需要对暴雨频率进行计算, 进而得到泥石流启动的临界降雨量; 临界水深计算法适用于泥石流灾害及降雨量数据较为缺乏区域, 采取方法主要是基于泥石流启动机制, 根据流域地形、松散堆积物特征等要素, 计算泥石流启动的临界水深, 进而推导出泥石流启动的临界降雨量。

在掌握泥石流流域汇水条件和物源分布情况的基础上, 本文采用临界水深法反推获取泥石流沟内松散堆积体启动的临界雨量值, 并在岷江上游汶川县七盘沟流域进行案例应用, 以期完善泥石流监测和预警系统提供一定的指导。

1 研究方法

1.1 松散堆积体的临界水深计算

松散堆积体主要受到两个力的影响: 重力和

* 收稿日期: 2017-11-23 修回日期: 2018-03-28

基金项目: 四川省青年科技基金项目(2017JQ0051); 国家自然科学基金项目(41371185); 教育部人文社会科学研究专项任务项目(工程科技人才培养研究)(15JJDGC019)

第一作者简介: 丁明涛(1981-), 男, 山东日照人, 博士, 教授, 主要从事地质灾害风险控制与聚落减灾研究。

E-mail: mingtaoding@163.com

孔隙水压力。由于泥石流沟床内的松散堆积体长度与宽度远远大于堆积体厚度,因此,松散堆积体的受力分析采用无限坡模型^[8,11]。假设泥石流松散堆积体厚度为 h ,坡度为 θ ,孔隙水深为 h_w ,其受力分析如图1所示。

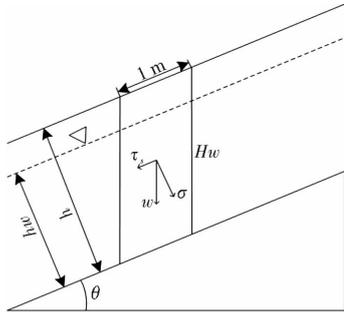


图1 松散堆积体受力分析

随着持续性降雨的发生,泥石流松散堆积体中水深将不断增加,从而使孔隙水压力增大,导致堆积体的有效应力下降、抗剪强度降低和安全系数减小。而泥石流松散堆积体的安全系数(FS)为其抗剪强度(τ_f)与剪应力(τ_s)的比值。根据极限平衡理论,当安全系数值为1时,表明松散堆积体处于极限平衡状态(临界破坏状态),此时松散堆积体将失稳,泥石流将启动。

(1)根据摩尔-库伦强度准则,欲求松散堆积体的抗剪强度,需知松散堆积体内摩擦角、内聚力、正应力以及孔隙水压力,其中内摩擦角与内聚力由松散堆积体物质构成所决定,此处暂不讨论。本研究松散堆积体抗剪强度其计算公式为:

$$\tau_f = c + (\sigma + u) \tan \varphi \quad (1)$$

其中:

$$\sigma = \rho_s g h \cos \theta \quad (2)$$

$$u = \rho_w g h_w \cos \theta \quad (3)$$

式中: τ_f 为松散堆积体的抗剪强度; c 为松散堆积体的内聚力; σ 为堆积体对沟床压力(正应力); u 为沟床面上孔隙水压力; φ 为松散堆积体的内摩擦角; ρ_s 为松散堆积体密度; ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度; h 为堆积体厚度; h_w 为水深; θ 为沟床坡度。

(2)剪应力 τ_s 为堆积体重力沿沟床平面往下方向上的分量,其计算公式为:

$$\tau_s = \rho_s g h \sin \theta \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度; h 为堆积体厚度; ρ_s 为松散堆积体密度; θ 为沟床坡度。

综上,松散堆积体的安全系数 FS 的计算公式如下:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_s} = \frac{c + (\rho_s g h - \rho_w g h_w) \cos \theta \tan \varphi}{\rho_s g h \sin \theta} \quad (5)$$

当松散堆积体的安全系数值为1时, h_w 即为泥石流发生时的临界水深,根据公式(5)推导,泥石流临界水深计算公式为:

$$h_w = \frac{\rho_s g h - \frac{\rho_s g h \sin \theta - c}{\cos \theta \tan \varphi}}{\rho_w g} = \frac{\rho_s h}{\rho_w} - \frac{\rho_s h \tan \theta}{\rho_w \tan \varphi} + \frac{c}{\rho_w g \cos \theta \tan \varphi} \quad (6)$$

1.2 泥石流的启动降雨量计算

依据“蓄满产流”理论,大气降水后,与地面接触存在消耗(植被吸收、大气蒸发、坡面径流等)和遗留(土壤蓄水、洼地填充等),而土壤与植被整体蓄水量有限,在暴雨情况下,当达到土壤与植被需水量极限后,就可能有泥石流灾害发生,此时即可通过泥石流临界水位深度,结合泥石流径流深,逆向推导出泥石流的启动降雨量。

启动降雨量是指泥石流启动时的实时降雨量,也被称为泥石流降雨量阈值。实际上,泥石流的启动是区域内实时降雨量和前期降雨量共同作用产生的效果。

前期降雨量指在泥石流暴发日前连续降雨后,经过蒸发、植被吸收、径流等过程后,仍对松散堆积体含水状况起作用的降雨量,前期降雨量的存在导致形成区内松散堆积体含水率增加,饱和度增大,进而导致松散堆积体强度降低,稳定性变差。前期降雨量可分为直接前期降雨量和间接前期降雨量。直接前期降雨量是指诱发泥石流启动的启动降雨量前的当日降雨量,其受到植被吸收、蒸发等活动的影响接近于无;间接前期降雨量指在泥石流暴发前几天流域内的降雨量,在经过地表蒸发、植物吸收等过程后,仍对泥石流产生作用的降雨量,也是土体的前期含水率。其计算公式为:

$$P_a = P_{a0} + P_z \quad (7)$$

式中: P_a 为前期降雨量; P_z 为直接前期降雨量,其计算公式为: $P_z = \sum_{t_0}^{t_n} r$ (式中: r 为降雨量; t_0 为当日降雨开始时间; t_n 为泥石流激发雨量开始时间); P_{a0} 为间接前期降雨量,其计算公式为: $P_{a0} = \sum_{i=1}^n K P_i$ 。式中: K 为衰减系数; P_i 为泥石流暴发前 i 天的当日降雨量。

在一定时间段内,泥石流总径流量平铺于整个泥石流流域面积上后,水层的深度即为径流深 R 。径流深与降雨量关系为:

$$R + W_m = P + W_b \quad (8)$$

式中: R 为径流深; W_m 为流域最大需水量,根据经验表明^[11],我国大部分流域最大蓄水量 W_m 一般为80~120 mm; P 为一次降雨量; W_b 为一次降

雨开始前土壤含水量。

根据泥石流临界水深 h_w , 径流深 R 又可表示为(本研究以 1 h 降雨强度作为泥石流激发降雨量):

$$R = \frac{3.6 \sum Q \Delta t}{F} = \frac{3.6Q}{F} \quad (9)$$

式中:

$$Q = BVh_w \text{ (取泥石流沟床横截面计算);} \quad (10)$$

$$V = \frac{m_c}{\sqrt{r_H \phi + 1}} R_w^{2/3} I^{1/2}; \quad (11)$$

$$\phi = (r_c - 1) / (r_H - r_c) \quad (12)$$

式中: Q 为泥石流流域内平均流量; F 为流域面积; Δt 为选择时间段; B 为泥石流沟床宽度; V 为泥石流的流速, 采用铁道科学研究所西南研究所的推荐公式计算; h_w 为泥石流临界水深; r_H 为泥石流容重; m_c 为泥石流糙率系数; R_w 为泥石流水力半径(相对于泥石流沟, 可用临界水深 h_w 代替); I 为水面比降(可用河床纵比降替代); ϕ 为泥石流修正系数; r_c 为泥石流土粒容重。

前期降雨量主要对一次降雨前土壤含水率造成影响, 因此可以使用前期降雨量替代(8)式中的土壤含水率 W_b ; 另可使用 1h 降雨量 I_{60} 替代一次降雨量 P ; 由此等式(8)可以变换为:

$$I_{60} + P_a = R + W_m \quad (13)$$

因为泥石流流域内最大蓄水量 W_m 为定值, 所以当泥石流发生时 $R + W_m$ 也为定值。相应的当 1 h 降雨量与前期降雨量 $I_{60} + P_a$ 达到这一定值时, 泥石流将会启动, 此时的 $I_{60} + P_a$ 即为泥石流的启动降雨量。但由于前期降雨量仅对土壤含水率造成影响, 因此可以忽略前期降雨量和流域最大蓄水量的影响, 此时 $I_{60} = R$, 所以径流深即为该区域内诱使泥石流暴发的启动降雨量。

2 案例应用

2.1 研究区概况

七盘沟位于汶川县威州镇七盘沟村, 岷江左岸, 沟口坐标为 $103^{\circ}32'40.49''E$, $31^{\circ}26'39.19''N$ (图 2)。七盘沟沟口附近交通便利, 有都汶高速公路和 G213 线公路通过。七盘沟流域属于高山峡谷区, 整体西北低东南高, 沟内斜坡陡峭, 沟床下切, 沟内基岩裸露, 极为破碎; 沟内出露地层岩性主要有千枚岩、结晶灰岩、白云岩、花岗岩和闪长岩等。由于靠近茂汶断裂, 区域小断层密集排列, 沟内地质构造极其复杂。七盘沟内人类工程活动活跃, 主要有前期建设开挖回填、开荒、矿山开发等, 在人类进行各类工程活动中, 由于建设开挖形成新的临空面, 开荒所导致的植被破

坏以及矿山开发所产生的各种废弃矿渣都为泥石流的形成提供了便利条件。

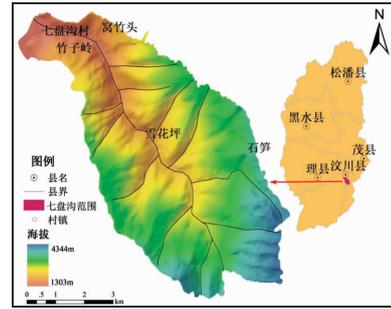


图 2 七盘沟泥石流流域地理位置

2.2 数据来源

本文数据主要来源于中国气象网站、七盘沟泥石流勘察报告和七盘沟流域卫星影像。在以上数据的支持下, 获取了七盘沟松散堆积体的分布情况、坡度、厚度、密度、内摩擦角和内聚力等基础参数, 其中: 松散堆积体分布范围主要来自对遥感影像的解译提取, 共获取 117 处物源点(图 3); 松散堆积体坡度来自对区域数字高程模型 (DEM) 的坡度分析(图 4); 堆积体的厚度、密度、内摩擦角、内聚力等要素来源于泥石流勘察报告(表 1)。

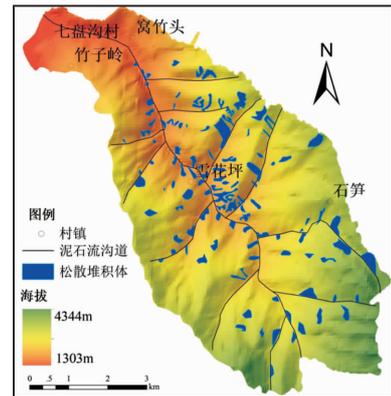


图 3 泥石流松散堆积体

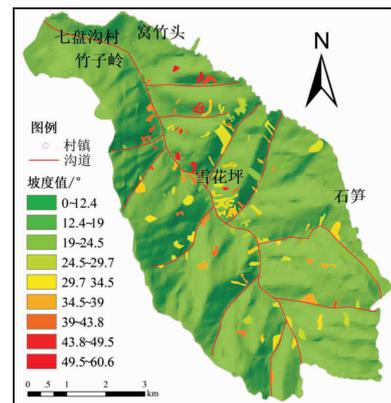


图 4 松散堆积体坡度图

表1 松散堆积体相关属性值统计

编号	内摩擦角/°	内聚力/kPa	堆积体厚度/m	堆积体密度/(g/cm ³)	编号	内摩擦角/°	内聚力/kPa	堆积体厚度/m	堆积体密度/(g/cm ³)
0	21	0	3.2	1.82	59	22	0	6.8	1.92
1	37	2	1.9	1.85	60	33	2	7.5	1.93
2	28	0	3.6	1.90	61	35	2	5.5	1.90
3	26	0	7.4	1.95	62	20	0	3.1	1.88
4	25	0	5.3	1.87	63	25	0	2.6	1.95
5	21	0	2.3	1.95	64	31	2	5.6	1.81
6	23	0	4.6	1.99	65	29	0	7.4	1.92
7	24	0	5.4	1.81	66	20	0	3.4	1.92
8	26	0	3.7	1.96	67	25	0	7.4	1.91
9	25	0	5.4	1.82	68	35	2	7.5	1.92
10	22	0	2.6	1.96	69	34	2	6.7	1.81
11	32	2	1.8	1.97	70	27	0	5.0	1.92
12	38	2	2.6	1.84	71	30	2	2.1	1.93
13	30	2	4.7	1.99	72	35	2	2.4	1.80
14	26	0	4.5	1.98	73	33	2	4.5	1.93
15	38	2	7.3	1.94	74	29	0	3.5	1.88
16	25	0	4.3	1.86	75	35	2	7.1	1.83
17	36	2	5.2	1.87	76	20	0	4.2	1.99
18	34	2	4.6	1.97	77	38	2	2.9	1.85
19	29	0	5.7	1.93	78	27	0	3.7	1.95
20	38	2	7.6	1.81	79	27	0	2.4	1.89
21	23	0	4.7	1.86	80	33	2	3.3	1.95
22	28	0	3.7	1.86	81	37	2	2.5	1.96
23	20	0	7.1	1.84	82	37	2	3.2	1.85
24	21	0	5.6	1.88	83	21	0	5.8	1.89
25	36	2	4.3	1.92	84	38	2	4.7	1.93
26	26	0	5.4	1.88	85	21	0	3.4	1.86
27	26	0	7.7	1.94	86	34	2	6.4	1.89
28	35	2	7.9	1.90	87	20	0	3.8	1.86
29	31	2	6.6	1.88	88	23	0	4.6	1.82
30	20	0	3.6	1.87	89	30	2	4.9	1.89
31	23	0	6.4	1.82	90	34	2	7.6	1.93
32	23	0	5.0	1.97	91	38	2	7.0	1.90
33	22	0	3.8	1.83	92	35	2	5.3	1.98
34	36	2	7.2	1.80	93	38	2	2.8	1.99
35	20	0	7.4	1.84	94	34	2	7.9	1.96
36	31	2	2.9	1.98	95	21	0	4.9	1.85
37	25	0	4.1	1.93	96	27	0	2.7	1.86
38	25	0	4.6	1.87	97	24	0	3.5	1.93
39	34	2	4.5	1.80	98	27	0	6.9	1.85
40	28	0	4.2	1.90	99	33	2	6.3	1.94
41	32	2	3.5	1.80	100	33	2	6.9	1.83
42	23	0	3.4	1.90	101	28	0	6.3	1.98
43	23	0	5.1	1.83	102	39	2	7.9	1.95
44	33	2	4.2	1.87	103	34	2	3.5	1.90
45	35	2	5.7	1.87	104	21	0	5.7	1.90
46	29	0	4.7	1.95	105	22	0	4.9	1.91
47	25	0	2.6	1.80	106	33	2	5.7	1.99
48	36	2	7.3	1.81	107	37	2	4.1	1.88
49	27	0	7.2	1.83	108	29	0	3.6	1.81
50	35	2	2.5	1.82	109	22	0	2.5	1.93
51	38	2	2.0	1.97	110	35	2	3.2	1.93
52	20	0	6.9	1.84	111	22	0	3.9	1.89
53	23	0	7.6	1.88	112	33	2	3.3	1.94
54	24	0	7.5	1.90	113	26	0	7.8	1.96
55	34	2	3.2	1.86	114	34	2	2.6	1.84
56	24	0	2.9	1.91	115	24	0	2.2	1.88
57	28	0	2.8	1.80	116	23	0	7.8	1.87
58	37	2	6.1	1.91					

2.3 七盘沟泥石流启动降雨量计算

根据公式(6), 计算获得七盘沟泥石流松散堆积体的临界水深值(图 5); 根据公式(11), 计算获得七盘沟泥石流松散堆积体的临界启动值(图 6); 根据公式(10), 计算泥石流流域内平均流量, 然后基于临界水深法关系式(13), 获得研究区不同松散堆积体启动所需的临界降雨量(图 7)。七盘沟松散堆积体的临界水深为 0.18 ~ 11 m, 松散堆积体临界启动值为 0.1 ~ 6.9 m/s, 泥石流松散堆积体启动降雨量为 0.1 ~ 174 mm。

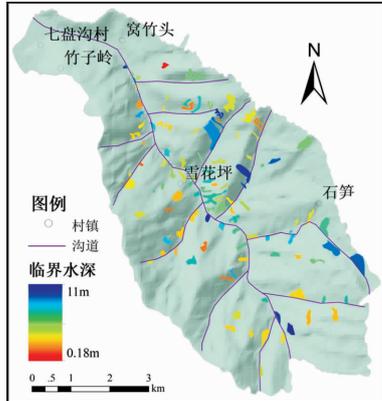


图 5 七盘沟泥石流松散堆积体临界水深

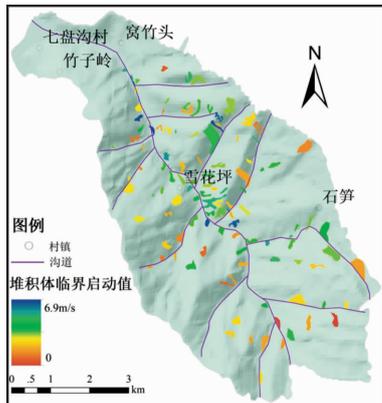


图 6 七盘沟泥石流松散堆积体临界启动值

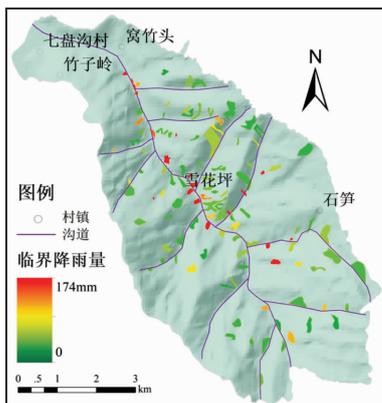


图 7 七盘沟泥石流松散堆积体启动降雨量

3 结论

本研究采用 GIS 技术, 参考泥石流短临预警需要, 以临界水深法求解泥石流启动的临界雨量值, 进而完善泥石流短临预警体系的构建。以汶川县七盘沟为典型案例, 在七盘沟泥石流勘察报告和遥感影像数据的支持下, 详细查明了七盘沟 117 处松散堆积体的分布状态, 研究结果表明: 七盘沟松散堆积体的临界水深为 0.18 ~ 11 m, 松散堆积体临界启动值为 0.1 ~ 6.9 m/s, 泥石流启动降雨量 0.1 ~ 174 mm。

本研究存在的不足之处以及今后需解决完善的地方主要有: ①本研究对启动降雨量的计算采用模型为临界水深法, 基于模型原理, 该模型主要应用范围为单沟泥石流, 本研究拟借助该模型与 GIS 技术的综合应用进行点(启动降雨量)对点(松散堆积体)的计算, 但基于实际条件限制(数据量不足), 对临界水深法模型的改进有所欠缺。②在本文案例应用中, 七盘沟流域的基础数据来源于野外调查与泥石流勘察报告, 由于数据量不足(所有松散堆积体的相关参数), 导致最终获取的启动降雨量数据不全。因此, 在今后泥石流短临预警体系的构建过程中, 针对缺少数据的松散堆积体进一步勘察分析。

参考文献:

- [1] 陈国阶, 方一平, 陈勇, 等. 中国山区发展报告——中国山区聚落研究[M]. 北京: 商务印书馆, 2007.
- [2] 康志成, 李焯芬, 马蔼乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] 丛威青, 潘懋, 李铁锋, 等. 降雨型泥石流临界雨量定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 2808 - 2812.
- [4] 高速, 周平根, 董颖, 等. 泥石流预测预报技术方法的研究现状浅析[J]. 工程地质学报, 2002, 10(3): 279 - 285.
- [5] Aleotti P. A. warning system for rainfall - induced shallow failures [J]. Engineering Geology, 2004, 73: 247 - 265.
- [6] 阮沈勇, 黄润秋. 基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(1): 89 - 92.
- [7] 程文波, 王华军. 矿井无线传感器网络建构方法研究[J]. 金属矿山, 2012(3): 107 - 109.
- [8] Biondi G, Cascone E, Magueri M, et al. Seismic response of saturated cohesionless slopes [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 20 (1 - 4): 209 - 215.
- [9] 宋志, 巴仁基, 刘宇杰. 四川康定母猪笼沟泥石流形成特征与物源定量计算[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23 (3): 39 - 45.
- [10] 杨顺, 潘华利, 王钧, 等. 泥石流监测预警研究现状综述[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 150 - 156.
- [11] Rex L. Baum, Jonathan W. Godt. Early warning of rainfall - induced shallow landslides and debris flows in the USA [J]. Landslides, 2010, 7: 259 - 272.
- [12] 徐黎明, 王清, 陈剑平. 资料缺乏地区诱发泥石流临界降雨量预测[J]. 铁道勘察, 2014(2): 75 - 78.

(下转第 63 页)