

风化作用对沟谷型泥石流发育环境的影响研究

余斌¹, 褚胜名², 朱渊¹, 谢洪³

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;
2. 四川省川建勘察设计院, 四川 成都 610017; 3. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 地质条件是泥石流发育环境的三大条件之一, 其主要作用是为泥石流提供固体物源。风化作用对产生泥石流固体物源的影响很大。以岩石的坚固系数为基础, 研究了物理及化学风化对形成泥石流固体物源的影响。研究表明: (1) 物理风化是形成泥石流物源的主要原因, 冰劈作用往往造成强烈的物理风化, 有利于泥石流的发育; (2) 化学风化不直接提供固体物源, 但碳酸根离子的存在使化学风化不利于泥石流的发育。研究得出岩石坚固系数的物理风化和化学风化修正方法, 最终得到形成泥石流的地质因子。形成泥石流的地质因子在汶川地震影响区内判别泥石流的暴发与否的应用研究中取得了较好的结果。

关键词: 泥石流发育; 物理风化; 化学风化; 坚固系数; 地质因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)06-0051-06

中图分类号: P642.23, X4

Impacts of Weathering on Formation of Gullied Debris Flow

YU Bin¹, CHU Sheng-ming², ZHU Yuan¹, XIE Hong³

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Sichuan Chuanjian Geotechnical Survey and Design Institute, Chengdu, Sichuan 610017, China; 3. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Geological condition, one of three debris forming factors, mainly provides the solid source for debris flow, and weathering plays very important role in the formation of solid source. The article analyzed the influence of physical and chemical weathering on the formation of solid source based on the rock firmness coefficient and concluded that: (1) The physical weathering, often caused by frost wedging in favor of the formation of debris flow, is the main reason for the development of the solid source of debris flow; (2) The chemical weathering does not provide the solid source directly while the carbanion is not in favor of the formation of debris flow. Based on the modification of the rock firmness coefficients by physical and chemical weathering, the geological factor forming debris flow is obtained, which was tested with good result in the judgment of debris flow outbreak in Wenchuan Earthquake area.

Keywords: formation of debris flow; physical weathering; chemical weathering; rock firmness coefficient; geological factor

泥石流是突发性的自然灾害,常造成重大的人员伤亡和财产损失。影响泥石流发育的自然环境因素较多,总体上可以归结为地形、地质和降水三大条件。其中,地质条件主要体现在为泥石流的发育提供丰富的固体物源。发育泥石流的地质条件主要与流域内的岩性、构造、地震烈度以及风化作用等有关。其中风化作用对形成泥石流固体物源的影响较大^[1-7]。目前对泥石流的发育条件研究中,风化作用及其程度的研究主要是定性描述,还没有系统地、定量地研究

其在泥石流形成中的作用。国内外学者通过修正普氏坚固系数^[8]获得流域岩性的定量描述^[1],以及加入构造、地震烈度以及风化的修正^[2-3],为定量描述泥石流形成的地质条件提供了一个新的途径,但对风化作用的确定还没有一个可行的方法,仅借助已有的调查及参考文献给出风化程度。在尚未开展详细调查的流域,则无法给出风化程度的判断。风化作用主要是指在大气、水与生物等的相互作用下,通过物理和化学的作用使得地壳表层的岩石在原地遭受破碎与破

收稿日期:2013-01-08

修回日期:2013-03-15

资助项目:国家自然科学基金项目“粗颗粒在泥石流屈服应力中的作用机理研究”(41372366); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究基金(SKLGP2012Z011)

作者简介:余斌(1966—),男(汉族),四川省成都市人,博士,教授,主要从事泥石流的发育、运动和堆积以及浊流的沉积研究工作。E-mail: drbinyu@yahoo.com。

坏的过程。根据风化作用的类型,可分为物理风化、化学风化及生物风化三类。生物风化作用主要体现在生物活动加剧岩石物理或化学风化的破坏作用^[9],相对较为次要。本研究暂不考虑生物风化的影响。

本研究在前人定量研究岩性、构造、地震烈度的基础上,通过分析物理风化和化学风化在形成泥石流固体物源中的作用,研究物理风化和化学风化在沟床起动类型泥石流发育中的作用,提出了对岩石坚固系数修正的物理和化学风化因素的修正因子。最终修正得到泥石流发育的地质因子,为泥石流发育研究提供了一个新方法。

1 物理风化

在泥石流发育中,泥石流流域岩性的平均坚固系数是重要的参数。泥石流流域岩性的平均坚固系数^[1-3]源于对普氏坚固系数^[8]的修改。它与泥石流的暴发频率和泥石流发生的难易程度关系为:泥石流流域的岩石越坚固,其固体物源则主要为崩塌产生,固体物质颗粒相对较大,积累时间较长,泥石流的暴发频率越低,泥石流发生越困难;反之,泥石流流域的岩石越软弱,其固体物源则主要由滑坡产生,固体物质颗粒相对较小,不需要长时间的积累,泥石流暴发频率越高,泥石流发生越容易。

本研究在已有的岩石平均坚固系数研究基础上^[1-3],增加了“软”和“松散”两部分岩土类型(表 1)。

当泥石流的固体物源为胶结较差的冰碛物时(如四川省泸定县海螺沟特大泥石流^[10]),岩土类型为“软”,坚固系数可以取 1.5。当泥石流物源为松散堆积体时(如四川省清平县文家沟泥石流^[11],贵州省关岭滑坡泥石流^[12]),岩土类型为“松散”,坚固系数可以取 0.5(因岩土类型已经是松散堆积体,不用再采用其它影响因素修正即可以得到最终的地质因子系数)。这样表 1 就概括了几乎全部与泥石流发育有关的岩土类型。

断裂构造作用使岩石的完整性、坚固性及稳定性均遭到极大的破坏。断裂带内软弱结构面较为发育,岩石较为破碎,为泥石流的发育提供了大量的松散固体碎屑物质。泥石流流域的断裂带的数目也直接影响着泥石流的发育情况。构造作用对泥石流流域坚固系数的影响系数详见表 2^[1-3]。

地震作用使山体的破碎性加重,岩石的强度降低,从而为泥石流发育提供更多的松散固体物质来源。地震烈度越大的地区,松散固体物质就越多。地震对泥石流流域坚固系数的影响系数详见表 2^[1-3]。

物理风化作用是形成泥石流物源的关键。昼夜温差的影响,尤其是冰劈作用都对物理风化产生巨大的影响。昼夜温度在 0℃ 上、下波动时,充填于裂隙中的水体融、冻频繁,造成岩石破坏,裂隙扩大^[9]。其风化作用的大小主要受所处区域的年降雨量和年平均温度的影响^[13]。

表 1 岩石坚固系数值

坚固程度	岩性组成	平均坚固系数 F_0
坚固	玄武岩、石英岩、橄榄岩等	14.0
	辉长岩、闪长岩、安山岩等	13.0
	花岗岩、流纹斑岩、角闪岩、石英(硅质)片岩、燧石岩、辉绿岩、石英正长岩等	12.0
中等坚固	白云岩、灰岩、片麻岩、硅质板岩、大理岩、砾岩等	10.0
	砂质(钙质、碱质)板岩,石英(硅质)砂岩等	9.0
	钙质砂岩等	8.0
弱坚固	千枚岩、凝灰岩、粉砂岩等	6.0
	云母片岩、泥灰岩、泥质砂岩等	5.0
	(泥质、砂质)页岩、泥岩等	4.0
软	软弱页岩、强风化的花岗岩、石膏、无烟煤、破碎的砂岩和石质土壤	2.0
	碎石质土壤,破碎的页岩,黏结成块的砾石、碎石,坚固的煤,硬化的黏土。	1.5
	软致密黏土、较软的烟煤、坚固的冲击土层、黏土质土壤	1.0
松散	砂、砂砾堆积、细砾石、松土、开采下来的煤	0.5
	流沙、沼泽土壤、含水黄土及其它含水土壤	0.3

注:物理风化修正系数 $C_3=1$ (强风化的花岗岩已经考虑了物理风化的影响,不再进行物理风化修正)。 $F=F_0$,即岩土类型为沟道松散堆积物时,不再用其它影响因素修正,坚固系数等于地质因子系数。

参照构造(断裂带)和地震烈度对岩石坚固系数的影响,以及物理风化的分级及系数关系^[2],物理风化也可以按照其强烈程度予以赋值,得到修正系数详见表 2。

由岩石平均坚固系数以及构造(断裂带)、地震烈度和物理风化的修正系数,可以得到修正的泥石流流域岩石坚固系数 F' :

$$F' = F_0 C_1 C_2 C_3$$

式中: F' ——修正泥石流流域岩石坚固系数; F_0 ——(带)修正系数; C_2 ——地震烈度修正系数; C_3 ——物理风化修正系数; C_1 ——构造(断裂带)修正系数。

表 2 断裂带(构造)、地震烈度和物理风化对岩石坚固程度的影响及系数赋值

影响因素	岩石坚固系数赋值			
	1	0.96	0.93	0.9
断裂带 C_1	没有断裂带通过,没有影响	有 1 条断裂带通过,影响不大	有 2 条断裂带通过,有一定影响	有多条深大断裂带通过,有较大影响
地震烈度 C_2	\leq Ⅵ度	Ⅶ度	Ⅷ度	\geq Ⅸ度
物理风化 C_3	微风化	弱风化	中等风化	强风化

2 化学风化

化学风化对发育泥石流的固体物源的影响远小于物理风化的影响。化学风化使岩石遭到破坏,而且还使破坏产物的化学成分发生显著的变化,并形成一些新矿物^[14]。在水中溶解度大的岩石为易溶性矿物,如岩盐、石膏等。自然界的水常含有硫酸、硝酸、碳酸及盐酸等酸性物质,因而增加了岩石矿物的溶解度。碳酸盐岩类矿物在含有 CO_2 的水中时,难溶的碳酸盐就形成了易溶的重碳酸盐从而被溶解。

碳酸盐岩主要由含量大于 50% 的沉积碳酸盐矿物组成。其岩石中代表性的矿物类型分别是方解石 $CaCO_3$ 和白云石 $CaMg[CO_3][OH]_2$ 。石灰岩的矿物组成成分中方解石和白云石占主要成分。两者甚至可占全部矿物重量的 90% 以上。白云岩主要含白云石,此外还含有方解石^[15]。石灰岩主要成分为方解

石,白云岩主要成分为白云石。碳酸根离子 CO_3^{2-} 在方解石 ($CaCO_3$) 中的含量为 60%,在白云石中 $CaMg[CO_3][OH]_2$ 的含量为 38%。表 3^[14] 为各类含方解石和白云石的一些常见岩石的区分与对比以及含碳酸根离子 CO_3^{2-} 的量。

实际的石灰岩和白云岩可能还含有少量黏土矿物。当石灰岩和白云岩的含量在 90% 以上时,仍然称为石灰岩和白云岩。石灰岩、白云岩与泥质岩的过渡关系详见表 4^[14]。由表 4 可得其各类岩石的碳酸根离子 CO_3^{2-} 的含量(表 5)。

表 3 中石灰岩和白云岩的平均碳酸根离子 CO_3^{2-} 含量分别为 58.9% 和 39.1%,而表 5 中的石灰岩和白云岩的平均碳酸根离子 CO_3^{2-} 含量分别为 57% 和 36.1%。由石灰岩和白云岩的定义可知,石灰岩和白云岩的含量在 90% 以上时为石灰岩和白云岩,因此石灰岩和白云岩的平均 CO_3^{2-} 含量下限分别为 57% 和 36.1%。

表 3 碳酸根离子在方解石与白云石中的含量

岩类	矿物含量/%		岩石名称	CO_3^{2-} 含量/%	平均 CO_3^{2-} 含量/%
	方解石	白云石			
石灰岩类	90~100	0~10	石灰岩	57.8~60.0	58.9
	75~90	10~25	含白云质灰岩	54.5~57.8	56.2
	50~75	25~50	白云质灰岩	49.0~54.5	51.8
白云岩类	25~50	50~75	灰质白云岩	43.5~49.0	46.3
	10~25	75~90	含灰质白云岩	40.2~43.5	41.9
	0~10	90~100	白云岩	38.0~40.2	39.1

表 4 矿物在石灰岩、白云岩和泥质岩之间的过渡类岩石中的含量

岩类	岩石名称	矿物含量/%			岩石名称	岩类
		方解石	黏土矿物	白云石		
石灰岩	灰岩	90~100	0~10	90~100	白云岩	
	含泥灰岩	75~90	10~25	75~90	含泥云岩	白云岩
	泥灰岩	50~75	25~50	50~75	泥云岩	
泥质岩	灰泥岩	25~50	50~75	25~50	云泥岩	
	含灰泥岩	10~25	75~90	10~25	含云泥岩	泥质岩
	泥质岩	0~10	90~100	0~10	泥质岩	

表 5 各类岩石中碳酸根离子的含量

岩石名称	CO ₃ ²⁻ 含量/%	平均 CO ₃ ²⁻ 含量/%	岩石名称	CO ₃ ²⁻ 含量/%	平均 CO ₃ ²⁻ 含量/%
灰岩	54~60	57.0	白云岩	34.2~38.0	36.1
含泥灰岩	45~54	49.5	含泥云岩	28.5~34.2	31.4
泥灰岩	30~45	37.5	泥云岩	19.0~28.5	23.8
灰泥岩	15~30	22.5	云泥岩	9.5~19.0	14.3
含灰泥岩	6~15	10.5	含云泥岩	3.8~9.5	6.7
泥质岩	0~6	3.0	泥质岩	0.0~3.8	1.9

钙质胶结岩石属于碳酸盐胶结物的一类,胶结物成分主要为方解石、白云石等,胶结物的成分为钙质,所胶结的岩石硬度比泥质胶结的稍大。而胶结物在岩石中的含量一般不超过 25%。若含量超过 25%时,即可用其它岩石的命名^[16]。由于钙质岩类只能确定其胶结物为方解石、白云石,并不能确定其含量的多少。因此,其矿物组成的碳酸根离子含量的上限为 9.5%~15%。

石灰岩与白云岩是碳酸盐岩的代表性岩石,由于碳酸根离子 CO₃²⁻ (平均含量>36.1%)的作用,化学风化十分明显,对泥石流的发育有很大的影响。尤其在湿润温暖的亚热带和热带地区,如贵州、云南、广西、四川等省的喀斯特地区表现的尤为突出。因此,定义碳酸根离子 CO₃²⁻ 含量>35%时,化学风化对泥石流的发育有很大的影响。钙质胶结岩石的碳酸根离子 CO₃²⁻ 含量上限为 9.5%~15%,其化学风化的影响较小,因此定义 CO₃²⁻ 含量≤15%时,化学风化对泥石流的发育影响较小。在 CO₃²⁻ 含量处于 15%~35%的中值,以 25%为界,定义 35%≥CO₃²⁻>25%时,化学风化对泥石流的发育有较大的影响。当 25%≥CO₃²⁻>15%时,化学风化对泥石流的发育有一定的影响。当无 CO₃²⁻ 含量时,化学风化对泥石流

的发育无影响。

化学风化对岩石的坚固程度的影响表现为化学风化越严重,岩石孔(洞)隙越大,岩石强度越小,坚固程度越低。本研究与泥石流发育有关的综合地质因素采用岩石的坚固系数表示,坚固系数越大,越不利于泥石流发育。仅考虑固体物源条件,化学风化使岩石受到溶蚀,岩体的整体坚固系数变小,易于塌陷破坏等,有利于泥石流发育。但化学风化对泥石流的水源条件有更大的影响,化学风化越强烈,流域内裂(洞)隙越多,越不利于地表水流的汇集,对泥石流发育越不利。这两个互为相反作用的结果,造成化学风化不利于泥石流发育,这是碳酸盐岩地区泥石流的发育程度较差的原因。

参照地质构造、地震烈度和物理风化对岩石坚固系数的影响及修正方法,根据化学风化不利于泥石流发育,提出影响发育泥石流的综合地质因素 F ,由岩石的修正坚固系数 F' ,乘以化学风化修正系数,得到综合地质因素 F 。 F 越大,越不利于泥石流发育。化学风化的修正系数及方法详见表 6。

$$F = F' C_4 = F_0 C_1 C_2 C_3 C_4$$

式中: F ——发育泥石流的综合地质因素; C_4 ——化学风化修正系数。

表 6 化学风化的修正系数

项目	CO ₃ ²⁻ 含量/%				
	0	15~0	25~15	35~25	>35
化学风化对泥石流发育的影响	无影响	影响较小	有一定影响	有较大影响	有很大影响
化学风化 C_4	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20

3 汶川地震影响区泥石流暴发实例验证

汶川“5·12”强烈地震影响区内发生多次群发性泥石流,如都江堰市龙池镇、阿坝州汶川县映秀镇、绵竹市清平乡、绵阳市北川县、平武县南坝镇等,但在这些群发泥石流过程中,并不是所有的小流域都发生了泥石流,甚至相邻的流域,就存在发生和没有发生泥石流的两种情况,这为研究泥石流的发育条件提供了

很好的素材。泥石流发育主要受地形、地质和降雨 3 大条件影响。由于缺乏详细的、精确到各小流域的降雨资料,只能近似地认为在各流域内发生泥石流时均有大范围的降雨过程时,小范围内的降雨条件基本一致。因此在群发区域中较小范围内,可以认为降雨过程基本一致,亦即降雨条件基本相同。当降雨条件基本一致,泥石流暴发与否的决定因素就只有地形条件和地质条件。在汶川地震影响区域内的震后群发泥

泥石流事件中,大多数泥石流都是沟床起动类型的沟谷泥石流。沟床起动类型的泥石流的地形条件可以用一个综合地形因素 G 表示^[17-18]。

$$G = TJ(A/A_0)^{0.2}$$

式中: T ——泥石流形成区形状系数(形成区流域面积与形成区沟长平方之比); J ——泥石流形成区纵比降; A ——泥石流形成区面积(km^2); A_0 ——单位面积(1 km^2)。

在震后群发泥石流事件中,汶川地震的发震断裂带上盘或下盘的区域所受地震的影响不同,需要区别对待。为了便于研究岩性和风化作用的影响,在群发

泥石流区域内选择的研究区域至少存在 2 种或 2 种以上岩性,在区域内兼有泥石流暴发和未暴发的流域同时存在,而且研究区域的范围较小,同时处于发震断裂带的上盘或下盘。2010 年 8 月 13 日绵竹市清平乡暴发群发泥石流,满足上述条件的区域包括:位于距映秀—北川断裂带下盘 1~4 km 和 4~8 km 的绵远河两岸的两个区域。区域内主要岩性分别为页岩、粉砂岩和砂岩、石灰岩以及一个原来是石灰岩但最后岩土类型是松散堆积体,研究得到区域内泥石流沟的地质因子 F 和地形因子 G ,以及 G 和 F 与泥石流的暴发关系(图 1)。

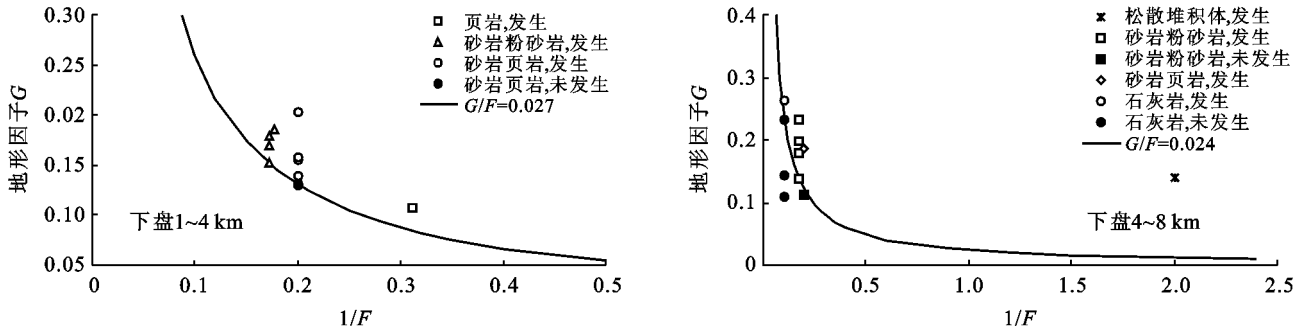


图 1 清平乡地质因子 F 和地形因子 G 的关系

2008 年 9 月 24 日绵阳市北川县的群发泥石流大部分位于映秀—北川断裂带上盘。本研究选取小区域按照与清平群发泥石流小区域同样的办法,选取研究区域位于上盘距断裂带 1 km 以内,1~4 km,4~8 km 等 3 个区域。区域内主要岩性分别为砂岩、千枚岩、板岩和碳酸盐岩。研究得到各区域的地质因子 F 和地形因子 G ,以及 G 和 F 与泥石流的暴发关系(图 2)。

同样将前述典型区域的分析方法,应用到绵阳市平武县南坝镇 2010 年 8 月 13 日群发泥石流区域。选取位于断裂带 1~4 km 的区域,区域内主要岩性分别为砂岩、粉砂岩、板岩和泥灰岩,得在该区域的地质因子 F 和地形因子 G ,以及 G 和 F 与泥石流的暴发

关系(图 3)。

图 1—3 中的泥石流流域地质条件应用本计算方法得到地质因子 F ,结合地形因子 G 的计算取值,在较小区域内降雨条件基本一致的情况下,可以得到大多数研究区域内明确的泥石流发生与否的界限, G/F 值越大,越容易发生泥石流;仅有绵阳市北川县 4~8 km 范围内有一些偏差。这可能与其范围稍大,降雨量存在一定差异有关。

从 G 与 F 在图 1—3 中的关系可得,在泥石流形成过程中,两者对泥石流的形成有同样重要的地位。判别值 G/F 在不同区域内有不同的临界值,临界值的大小由该区域内的降雨量、受地震的影响程度(上下盘、与断裂带的距离等)决定。

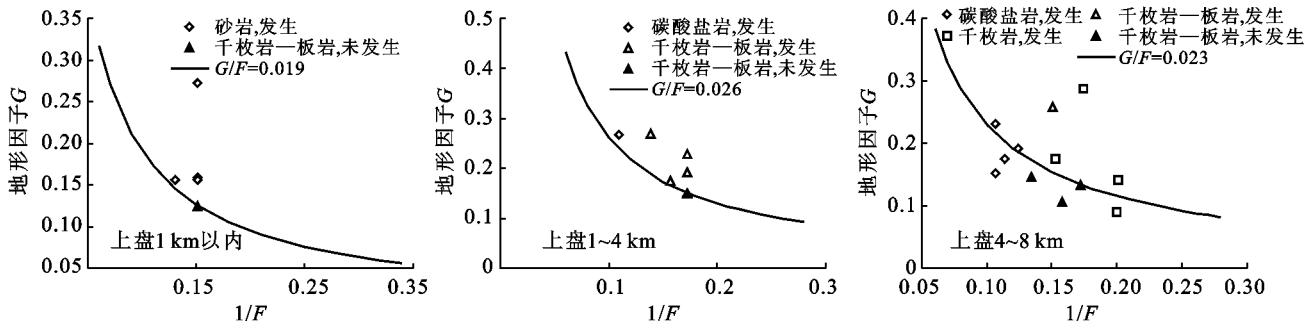


图 2 北川县地质因子 F 和地形因子 G 的关系

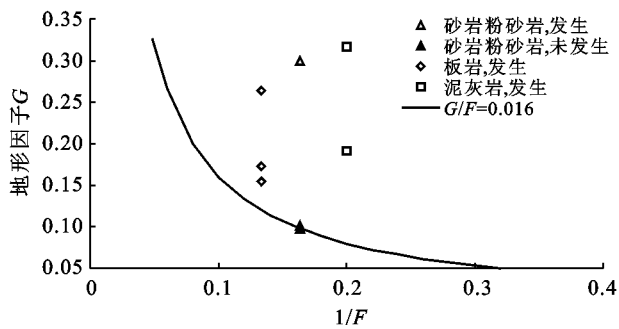


图 3 南坝镇上盘 1~4 km 地质因子 F 和地形因子 G 关系

4 结论

(1) 物理风化作用对泥石流固体物源的发育影响很大,温差的影响,尤其是冰劈的作用造成岩石破坏,形成泥石流物源。

(2) 化学风化作用对泥石流固体物源的发育有利,但影响较小;化学风化作用对泥石流发育的水源有较大的不利影响;这两个互为相反作用的结果是化学风化不利于泥石流发育,这是碳酸盐岩地区泥石流的发育程度较差的原因。

(3) 以修改的普氏坚固系数得到的岩石平均坚固系数为基本数据,结合泥石流流域内的构造、地震等条件,采用物理风化和化学风化修正,可以得到综合的地质因子。

(4) 在汶川地震影响区内的较小区域内降雨条件基本一致的情况下,结合地形因子采用本研究的地质因子判别泥石流的暴发与否,与实际情况基本一致。

(5) 尽管本方法在汶川地震影响区的一些区域内得到了验证,但验证范围仍然较小,还需要在其它有不同岩性的地区继续验证方法的正确性。

[参 考 文 献]

[1] 鲁科,余斌,韩林,等. 泥石流流域岩性的坚固系数与暴发频率的关系[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 980-990.

[2] 韩林,余斌,鲁科,等. 泥石流暴发频率与其形成区块石粒径的关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(9): 1149-1156.

[3] Yu Bin, Chu Shengming, Lu Ke, et al. A Study About the Relationship Between the Frequency of Debris Flows

and Lithology[C]// Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society Through Improved Understanding- Eberhardt, 2012: 757-761.

- [4] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000.
- [5] 唐川,章书成. 水力类泥石流起动机理与预报研究进展与方向[J]. 地球科学进展, 2008, 23(8): 787-792.
- [6] 田连全,张宝兴,吴积善. 试论泥石流的形成过程[C]// 泥石流论文集 1. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1981: 54-57.
- [7] 吴积善,田连全,康志成,等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 72.
- [8] Protodyakonov M M. Mechanical Properties and Drillability of Rocks[C]// Proceedings of the Fifth Symposium on Rock Mechanics. Minneapolis, MN: University of Minnesota, 1962: 103-18.
- [9] 夏邦栋. 普通地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 135-139.
- [10] 陈晓清,崔鹏,陈斌如,等. 海螺沟 050811 特大泥石流灾害及减灾对策[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 122-126.
- [11] 余斌,马煜,吴雨夫. 汶川地震后四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流灾害调查研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 827-836.
- [12] 殷跃平,朱继良,杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡一碎屑流研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 445-454.
- [13] Fookes P G, Dearman W R, Franklin J A. Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and Elsewhere[J]. The Quarterly Journal of Engineering Geology, 1971, 4(3): 161-163.
- [14] 陈国勋,刘岫峰,李亚美,等. 地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- [15] 崔洪庆,韦重韬,司荣军. 地质学基础[M]. 江苏 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008: 68.
- [16] 陈希廉. 地质学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986: 55.
- [17] Yu Bin, Li Li, Ma Yu, et al. Research on Topographical Factors in the Formation of Gully Type Debris Flows[C]// River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM2011. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 1-10.
- [18] 李丽. 强震区群发性沟谷型泥石流地形因子研究[D]. 四川 成都: 成都理工大学, 2012.