

强降雨在山地灾害链成灾演化中的关键控制作用

崔云^{1,2}, 孔纪名¹, 田述军^{1,2}, 阿发友^{1,2}

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 经历了 2009 年的干旱后, 2010 年雨季, 中国西部山区山地灾害频繁暴发并演化成灾害链, 强降雨起到了关键控制作用。降雨使山地灾害链极大扩展了空间影响范围, 加速了演化进程。选取灾害链演化中的滑坡、泥石流两个关键环节, 构建力学模型, 对降雨的控制激发作用进行分析, 分别以贵州关岭滑坡 - 碎屑流灾害链、甘肃舟曲泥石流 - 堰塞湖灾害链为典型实例进行验证, 最终得出结论: 强降雨激发滑坡、泥石流形成的控制作用是通过特殊的水作用机制体现的, 久旱强降雨是灾害链预警防控的关键时段。

关键词: 强降雨; 山地灾害链; 关岭滑坡; 舟曲泥石流

中图分类号: P642. 2, X141

文献标识码: A

2009 年中国西部山区降水量异常偏少, 众多地区连续经历了数月旱灾, 2010 年随着雨季的到来, 强降雨条件使得灾害也出现了暴发趋势, 各类灾害最突出的表现形式就是山地灾害链, 以崩塌 - 滑坡、滑坡 - 泥石流灾害链最为典型。据国土资源部统计, 2010 - 04 - 06 全国共发生山地灾害 19 254 起, 其中滑坡 14 480 起、崩塌 3 915 起、泥石流 594 起, 316 人死亡, 直接经济损失 18. 13 亿元^[1]。与其他年份同期相比, 发生数量、造成的死亡人数和直接经济损失均明显增加。

山地灾害链在雨季暴发, 强降雨成为山地灾害链成灾演化的关键控制因素。据统计, 2010 - 07 - 08 全国特大型和大型山地灾害事件 43 起, 因强降雨原因引发的多达 39 起^[1]。自贵州省关岭县“6. 28”特大山体滑坡 - 碎屑流灾害链、甘肃舟曲“8. 7”特大泥石流灾害链、2010 - 08 - 12 开始的四川汶川地震灾区多处特大山洪 - 泥石流灾害链等几次具有重大影响和典型意义的灾害事件后, 强降雨激发山地灾害链的问题就成了国家层面、社会大众和相关专家普遍关注的热点, 降雨激发滑坡、泥石流的机理

认识问题一直是山地灾害研究领域的难点问题, 也是制约灾害有效防治和预警预报的关键。本文针对典型的滑坡 - 泥石流灾害链, 抓住滑坡发育和泥石流起动两个灾害链成灾演化关键环节, 尝试从灾害链链式作用机理角度, 探讨降雨的灾害链式激发作用机制, 为加深降雨激发山地灾害的认识以及为灾害防治、预警预报实践提供一定的理论借鉴。

1 山地灾害链的概念界定

灾害的发生都是其所处环境内部和外部因素综合作用的结果, 不同环境及其相互作用的形式和程度差异, 致使灾害具有不同的规律和发生机制^[2]。山地灾害一经发生, 极易借助自然生态系统之间相互依存、相互制约的关系, 产生连锁效应, 由一种山地灾害引发出一系列山地灾害, 从一个地域空间扩散到另一个更广阔的地域空间, 这种呈链式有序结构的大灾传承效应称为山地灾害链。山地灾害链是一种灾害的特殊组合形式, 具有自身独特的内涵。

1. 滑坡与泥石流是山地灾害链的中心载体

收稿日期 (Received date): 2010 - 08 - 27; 改回日期 (Accepted): 2010 - 10 - 11。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金重点项目 (50639070)。[Founded by NSFC(50639070).]

作者简介: 崔云 (1982 -), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 主要从事山地灾害预测与评估。[Cui Yun (1982 -), male, born in Zibo Shandong, Ph D, major in predicting and evaluating of mountain hazards.] E - mail: cuiyun82816@126. com, Tel: 13699011394

* 通讯作者 (Corresponding author): 孔纪名 (1956 -), 男, 研究员, 主要从事斜坡变形破坏规律研究。[Kong Jiming (1956 -), male, Professor, Major in landslide deformation and failure regularity.] E - mail: jimingk@imde. ac. cn

根据灾种的不同,山地灾害链又可以划分为崩塌-滑坡灾害链、滑坡-堰塞湖灾害链、滑坡-泥石流灾害链、山洪-泥石流灾害链等不同类型。在各类山地灾害链中,滑坡是灾害链的成灾演化之源,泥石流的启动是灾害链演化成灾的关键环节,滑坡与泥石流都是灾害链的中心载体,最典型的灾害链类型也是滑坡-泥石流灾害链。

2. 降雨是山地灾害链过程中的关键控制因素之一

根据激发因素的不同,山地灾害链可以划分为地震灾害链、降雨灾害链、人为灾害链类型,其中降雨较之于地震、人为活动是发生最频繁,影响最直接的作用形式。因此,降雨灾害链也是最为普遍的灾害链形式。山洪、崩塌、滑坡、泥石流等山地灾害,基本都可以在降雨激发作用下产生,降雨还是山洪和泥石流搬运的水源载体,因此,探寻降雨的激发控制作用,不仅对灾害单体防治具有一定借鉴的意义,而且对整个灾害链的断链防控起到重要作用。

综上所述,滑坡形成是山地灾害链的演化之源,泥石流启动是山地灾害链演化的关键环节,强降雨在这两个关键演化过程中都发挥了重要作用。因此,本文将重点以降雨灾害链中的具有典型代表意义的滑坡-泥石流灾害链类型为例,对降雨的激发控制作用机理进行分析。

2 降雨山地灾害链的链式作用

1. 前期灾害为后期演化提供条件

降雨山地灾害链,连锁性强烈。一种灾害的发生,会滞后演变成为新的山地灾害^[3]。泥石流与滑坡的伴生演化过程最为明显:泥石流形成的主要因素之一就是松散物质源的供应,滑坡的形成正好满足这种条件,并且两者形成的主要诱导因素都是强降雨,都有丰沛的水源供应。因此,在松散物质覆盖层较厚的山区,发生泥石流的同时,一般都伴随有滑坡的发生。因此,许多泥石流就是在滑坡的基础上形成的。

2. 链式作用的拓展性扩大了灾害的空间影响范围

各个灾害体之间相互作用,泥石流与滑坡相伴相生,同时也拓展了灾害的空间影响范围。以银杏乡磨子沟崩塌-滑坡-泥石流-堵江洪水灾害链为例^[4],山体上部的崩塌激发山坡中部的滑坡体滑

动,在强震作用下崩滑碎屑物质堆积在沟道,在2008-07中旬的降雨中形成泥石流,堵塞2/3的岷江河道,水位上升使一碗水村被淹。在整个灾害链演化过程中,空间范围从山体到沟口,再到河流,最后影响上、下游较大的区域,这就构成了灾害链的空间扩展。

3. 链式作用的阶段性加速了灾害的演化进程

链式阶段性是灾害发育过程的重要反映,是物质和能量信息聚集与转换状态的标志,也是认识灾害链、控制灾变发育的突破口^[5]。降雨灾害链阶段性可以划分为早期孕育阶段、中期诱发阶段与后期成灾阶段(表1)。因此,早期滑坡发育、泥石流启动阶段是滑坡、泥石流成灾过程的关键环节,也是认识灾害链阶段的关键,在早期较长时间的孕育阶段后,中期强降雨激发作用可以大大加速灾害能量蓄积和演化进程。

表1 降雨山地灾害链链式作用阶段划分

阶段	载体	过程特征	时间比率
早期	灾害基本条件	孕育、能量蓄积	80%
中期	强降雨	诱发、灾变	15%
晚期	生命、财产	成灾、进一步演化	5%

3 强降雨对滑坡发育的控制作用

3.1 强降雨控制滑坡的时空分布

多数滑坡时间分布与雨季对应。以长江上游为例,据调查统计显示:94%的滑坡是发生在雨季(表2)。

表2 长江上游地区雨季(5—9月)滑坡发生数量统计

地区	滑坡数量/个	雨季数量/个	所占比率/%
毕节地区	42	40	96
甘肃南部	213	203	95
万州地区	294	256	87
凉山地区	212	203	95
金沙江下游	477	458	96
合计	1 238	1 160	94

滑坡空间分布也与降雨量密切相关。从全国滑

坡分布格局来看,如果以 800 mm 等降水量秦岭—淮河一线为界,滑坡数量差异性明显,南方明显多于北方^[6],其中川、陕、滇、甘、青、黔、鄂诸省则是中国西南季风区和东南季风区,夏季强降雨频繁集中是造成滑坡集中分布的主要原因。

从 2010 年雨季实例而言,据统计,2010-07—08 全国特大型和大型滑坡事件 43 起,因强降雨原因引发的多达 39 起,占到了 90.70%,发生区域全部位于秦准线以南,以西南和中南的部分地区最为集中,发生数量居于前三位的依次是四川、江西和福建,全部与强降雨分布相对应^[1]。

3.2 强降雨控制滑坡发育的力学机制

强降雨控制滑坡发育,集中表现在强降雨会改变土体的静水压力、动水压力与浮托力的作用三方面,进而可以对坡体产生力学效应^[7]。本文建立降雨激发滑坡发育的一般模型进行力学分析(图 1)。

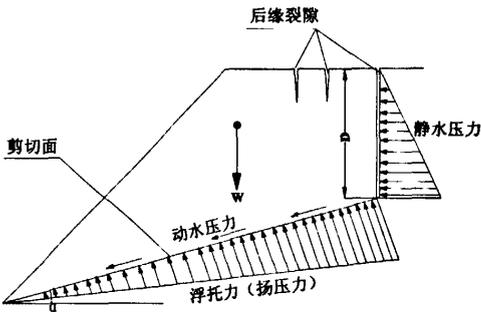


图 1 降雨控制滑坡发育示意图

Fig.1 Schematic diagram; effect of rainfall on the landslide development

1. 强降雨入渗,提高静水压力,加速剪切过程

由于坡体表层岩体的重力作用,使其后缘产生拉应力,当达到并超过岩体的抗拉强度,后缘便出现拉裂缝,随着降水的入渗,则在坡体中产生静水压力 $\sigma_{\text{静}}$

$$\sigma_{\text{静}} = \gamma_w \cdot x \cdot \cos\alpha \quad (1)$$

式中 $\sigma_{\text{静}}$ 为水体对坡体后缘张裂裂缝的静水应力, x 为裂缝壁到坡面的距离, α 为剪切面的倾角, γ_w 为水的重度。

由于后缘裂隙静水压力的介入,以及与后缘坡体拉应力的共同作用,促使裂隙进一步加深,达到剪切面时,即 $x = D$ 时,停止发育,此时静水压力达到最大,形成滑动剪切面。

2. 降雨持续渗流,使动水压力增加,加速滑动
强降雨产生的地表水持续沿拉裂隙渗入坡体,剪切面贯通后,动水压力、有效接触力、抗剪强度、坡体稳定性如下变化。

1) 由于水的渗流作用,施加给坡体的动水压力 ΣP_d 增加

$$\Sigma P_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot l \quad (2)$$

式中 ρ 为裂隙率, v 为渗流速度, l 为滑坡体宽度。

2) 由于水的扬压力,产生浮托作用,使得坡体颗粒间的有效接触压力降低,有效应力 σ_e 为

$$\sigma_e = \sigma - \sigma_w \quad (3)$$

式中 σ 为干燥坡体内应力, σ_w 为扬压力

3) σ 降低,水体入渗同时导致 C 、 φ 降低,剪切面土的抗剪强度 S 也随之急剧减小

$$S = \sigma_e \cdot \tan\varphi + c \quad (4)$$

式中 φ 为滑面内摩擦角, C 为滑面粘聚力

3. 综合分析滑坡体的稳定性

当 $x < D$, 后缘裂缝未到剪切面时,滑坡体的极限平衡方程为

$$K = \frac{\Sigma W_i \cdot \cos\alpha_i \cdot \tan\varphi_i + \Sigma C_i \cdot l_i}{\Sigma W_i \cdot \sin\alpha_i + \Sigma P_{\text{静}}} \quad (5)$$

式中 K 为稳定系数, α_i 为分段剪切面倾角, W_i 为分段体重, $\Sigma P_{\text{静}}$ 为静水压力的总和。

由公式可见,静水压力 $\Sigma P_{\text{静}}$ 增加,稳定性系数 K 减小。

当 $x = D$, 后缘裂缝达到剪切面时,滑坡体极限平衡方程为

$$K = \frac{W_i \cdot \cos\alpha \cdot \tan\varphi_i + \Sigma C_i \cdot l_i}{\Sigma W_i \cdot \sin\alpha_i + \Sigma P_{\text{静}} + \Sigma P_{\text{动}}} \quad (6)$$

式中 $\Sigma P_{\text{动}}$ 为动水压力的总和。

由公式可见,静水压力 $\Sigma P_{\text{静}}$ 、 $\Sigma P_{\text{动}}$ 均增加,稳定性系数 K 减小。

综上所述,强降雨激发滑坡发育的力学作用过程如下:

强降雨可以在短时间内造成地下水水位的大幅度变化,从而可以引起坡体静水压力 $\Sigma P_{\text{静}}$ 、动水压力 $\Sigma P_{\text{动}}$ 急剧增加,稳定性系数 K 快速减小,当 $K < 1$ 时,滑坡就可以发生。

强降雨的渗入,使得岩土颗粒间距增大而使分子吸引力的强度迅速衰减,从而导致岩体 C 、 φ 值明显降低,同时由于水的浮托作用,扬压力 σ_w 增大,施加在坡体内的有效应力 σ_e 减少,引起土体的抗剪强度 S 明显降低,最终使得稳定系数 K 降低,从而

促进滑坡的发生。

3.3 典型实例分析——贵州关岭滑坡-碎屑流灾害链

2010-06-28 T14:00,贵州省安顺市关岭布依族苗族自治县岗乌镇大寨村(N25°59'08.2",E105°16'56.3")发生强降雨,致使发生大规模山体滑坡,引发滑坡-碎屑流灾害链。

贵州关岭滑坡-碎屑流灾害链具有明显的阶段性、区段性,时空演化特征明显,时间扩展超过1a,空间影响水平距离超过1km(图2)。该灾害链阶段性明显。据当地居民介绍,2009年斜坡上部已经出现地表裂缝,滑坡孕育时间超过1a,发生剧烈滑动过程仅持续几分钟。整个灾害链演化区段可以分为两部分:斜坡上部滑坡区与沟道碎屑流动区。在沟道碎屑流区,以永窝和大寨村民组的两次撞击转向为界,堆积物自上而下可以分为三段:块石堆积区、第一次折向碎石土堆积区和第二次折向碎石土堆积区。

贵州关岭滑坡-碎屑流灾害链是由突发强降雨激发,而前期多月降水明显少于平均年份。本次连

续强降雨从06-26开始到06-28结束,历时3d,累计总降雨量310mm,超过当地6月多年平均降雨量28mm,其中06-27 T21:00—06-28 T14:00,17h累计雨量达253mm,占到本次强降雨过程的81.61%(表3),是引发本次灾害链的主因。根据关岭县2009-05—2010-06降雨量与多年平均降雨量的趋势对比分析(图3),前13个月的实际降雨量均小于历年平均值,6月是历年年降雨最多的月份,2010-06超过多年平均26.45%,是典型的久旱之后的强降雨过程。

本次灾害链,滑坡起动的力学机制是典型的久旱强降雨作用后,在短时间内引起地下水位的大幅度变化,从而可以引起坡体静水压力、动水压力、扬压力急剧增加,滑的岩土强度的降低稳定性系数 K 快速减小,当 $K < 1$ 时,滑坡就可以发生。

本滑坡主要参数为:滑面产状 $170^\circ \angle 45^\circ$,长200m,宽300m,后缘厚30m,主滑方向 325° 。由于地下水的渗流速度无实测值,所以取经验值 $v = 10 \text{ m/d}$,据公式6,经简单计算得: $K = 0.72 < 1$ 。可见,强降雨激发了本次滑坡-碎屑流灾害链。

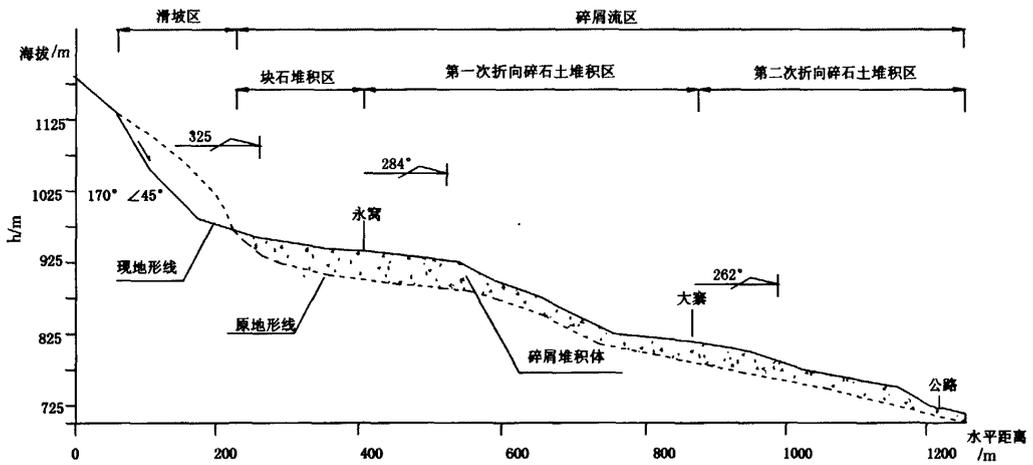


图2 贵州关岭滑坡-碎屑流灾害链演化过程剖面图

Fig. 2 Evolution profile of Guanling landslide-debris flow hazards chain

表3 贵州省关岭县1971—2000年历年月平均气温与降雨量统计表^[8]

Table 3 Mean temperature and rainfall amount from 1971 to 2000 in Guanling

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
气温/℃	6.3	8.1	12.5	16.7	19.4	21.3	22.1	21.5	19.3	15.9	11.8	8
降雨量/mm	25.1	27.3	36.3	65	166.1	257.8	241.8	205.6	151.6	97.8	50.5	17

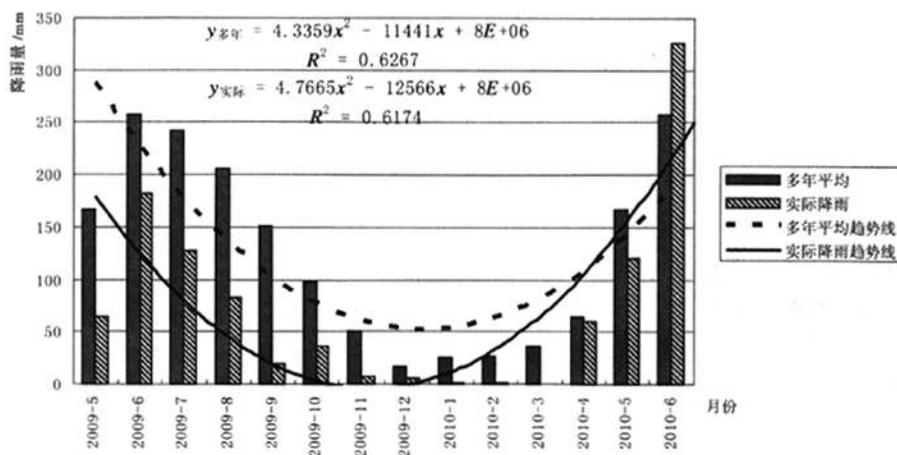


图3 贵州省关岭县2009-05—2010-06降雨量与多年平均降雨量对比图

Fig. 3 Comparison chart between the actual rainfall and the average annual rainfall from 2009-05 to 2010-06 in Guianling

4 强降雨对泥石流起动的激发作用

4.1 强降雨控制泥石流的时空分布

泥石流时间分布与雨季强降雨对应。我国东部、东南部、西南等湿润地区大多为季风气候,每年降雨量多集中在7—9月,也是泥石流高发的季节。据众多的研究资料表明,泥石流必须在一定的雨强(小时雨强或10 min雨强)激发条件下才能启动发生。从众多泥石流发生的小时雨强资料可以看出东部地区 >50 mm/h、西部地区 $>20\sim 25$ mm/h、西南地区 $>30\sim 40$ mm/h,就能激发泥石流^[9]。

泥石流空间分布也与降雨量密切相关。在年降雨量 <200 mm地区,一般不存在灾害暴雨泥石流。年降雨量 >600 mm的地区,暴雨泥石流的分布明显地开始密集起来。根据对暴雨泥石流危险度区划结果,处于高危险度和较高危险度的地区面积占到全国国土面积的13%,主要分布在四川、云南、西藏、重庆、陕西、甘肃、湖北等省市,均处于年降雨量大而且集中的区域^[10]。

从2010年雨季实例而言,甘肃舟曲县08-07的强降雨,引发了“8.7”特大山洪泥石流灾害;自08-12开始的强降雨引发四川汶川地震重灾区10个市(州)发生特大山洪泥石流,其中,极重灾区绵竹市清平乡和汶川县映秀镇及都江堰龙池镇受灾最为严重。

4.2 强降雨激发泥石流起动的力学机制

强降雨激发泥石流启动是通过减小土体内聚力和增加水的作用力实现的,本文取一粒松散碎屑体为泥石流起动的简化模型进行力学分析(图4)。

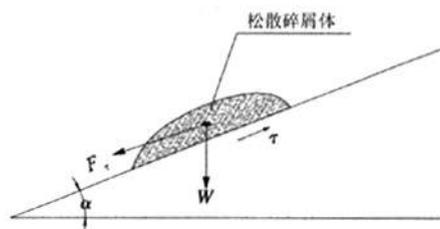


图4 坡面松散碎屑物质启动受力示意图

Fig. 4 The force diagram of loose slope debris material

图中 F_r 为坡面水流的作用力, W 为松散碎屑物质的自身重力, τ 为阻止松散碎屑体运动的力,简称阻力。松散碎屑体能否启动,取决于下坡方向的有效动力 F 和阻力 τ 的相对大小,表达为稳定性系数 K

$$K = \frac{\tau}{F} \quad (7)$$

1. 起动力:下坡方向的有效动力,简称起动力。主要有重力在下坡方向的分力和运动水流的作用力,所以,起动力可近似表示为

$$F = W \cdot \sin\alpha + F_r \quad (8)$$

式中 α 为坡度。 F_r 为水动力

降雨后,坡体水量突然增加,水流作用力急剧上升,起动力必然剧增。

2. 阻力:可分解为松散碎屑体自重正压作用引起的摩擦力 τ_f 和土粒内聚力 C 两部分。

1) 摩擦力就是松散碎屑体相对于坡面母体运动时,由界面颗粒间的摩擦和咬合作用引起产生阻止其运动的力,可表示为

$$\tau_f = F \cdot W \cdot \cos\alpha \quad (9)$$

式中 f 为摩擦系数。

2) 土粒间的内聚力,是由土壤颗粒间的接合水和胶结物等所形成的土粒间的连接力。其力的大小主要取决于土的密度和土壤含水量。一般说来,密度越大,内聚力越大,土壤含水量越大则内聚力越小,反之亦然。据此概念,提出内聚力的表达式如下

$$C = (k_0 - k_1\theta) \cdot A_s \quad (10)$$

式中 θ 为松散碎屑体含水率, A_s 为松散碎屑体与坡面母体接触面积, k_0 为最大单位面积内聚力, k_0 和 k_1 均为常数。

对于同一松散碎屑体在一段不长的时期而言,土体密度变化不大,而土壤含水量则随强降雨迅速增加,最终导致土壤渗水饱和,颗粒粘聚力减小而失稳起动。

3. 将公式(8)~(10)代入(7),可得松散碎屑体起动平衡公式为

$$K = \frac{F \cdot W \cdot \cos\alpha + (k_0 - k_1\theta) \cdot A_s}{W \cdot \sin\alpha + F_r} \quad (11)$$

式中表明,如果 $K > 1$,起动力小于阻力,松散碎屑体稳定不运动,如果 $K < 1$,则松散碎屑体失稳而下运动,而 $K = 1$ 为起动的临界条件。

强降雨致使水动力 F_r 增加,松散碎屑体含水率 θ 增加,内聚力减小,导致稳定系数 K 减小,而松散碎屑体失稳,最终导致泥石流起动。

4.3 典型实例分析——甘肃舟曲泥石流-堰塞湖灾害链

2010-08-07,甘肃省甘南藏族自治州舟曲县突降强降雨,县城北面的罗家峪、三眼峪沟松散碎屑物质成灾演化形成泥石流下泄,由北向南冲进县城,沿河房屋被冲毁,白龙江被堆积物阻断形成堰塞湖(图5),构成极其严重的泥石流-堰塞湖灾害链。

舟曲泥石流-堰塞湖灾害链与久旱强降雨相关。据资料^[1],08-07T23:00~24:00,三眼峪、罗家峪流域小时降水量达 96.77 mm,0.5 h 瞬时降水量达 77.3 mm。小时降雨量超过 8 月多年平均降雨量 16.59%(表 4),极端高强度瞬时降雨是引发本次灾害链的主因。根据舟曲县 2009-09-2010-08 降

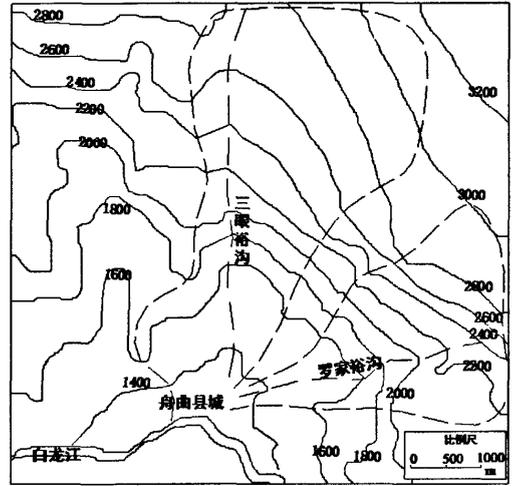


图5 舟曲泥石流灾害链流域分布示意图

Fig.5 Valley chart of Zhouqu debris flow chain

雨量与多年平均降雨量的趋势对比分析(图6),2009-09前,2010-01-07,实际降雨量均小于历年平均值,2010-07是历年降雨量最多的月,2010-07少于多年平均64.24%,而2010-08降雨量急剧增加,超过多年平均42.17%,是典型的久旱之后的强降雨过程。

舟曲泥石流灾害链2010-08-07的突发性强降雨作用,极大改变了坡面已有松散碎屑物质水动力条件。据松散碎屑体起动的临界公式(11)分析可知,降雨作用使崩滑堆积体的水动力 F_r 剧烈增加,而含水率增加,内聚力减小,导致稳定系数 K 减小,使得松散碎屑体起动演化成泥石流,最终导致了本次暴雨泥石流灾害链事件。

5 结论

1. 滑坡与泥石流是山地灾害链的中心载体,降雨引发滑坡失稳和泥石流起动是山地灾害链成灾演化的两个关键环节。

2. 降雨使得山地灾害链的链式作用特征明显,扩大了空间影响范围,加速了演化进程。

3. 强降雨激发滑坡、泥石流形成的控制作用是通过特殊的水作用机制体现的。强降雨控制滑坡发育,集中表现在强降雨会改变土体的静水压力、动水压力与浮托力的作用三方面,进而可以对坡体产生力学效应。强降雨激发泥石流起动是通过减小土体内聚力和增加水的作用力实现的。

表4 甘肃省舟曲县1971—2000年平均气温和降雨量统计表^[11]

Table 4 Mean temperature and rainfall amount from 1971 to 2000 in Zhouqu

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
气温/℃	3.3	5.9	10.3	15.8	19.7	22.6	24.7	24.2	19.5	14.9	9.7	4.5
降雨量/mm	1.9	2.8	13.5	33.9	60.1	73.3	86.7	83	75.4	34.3	6.2	0.8

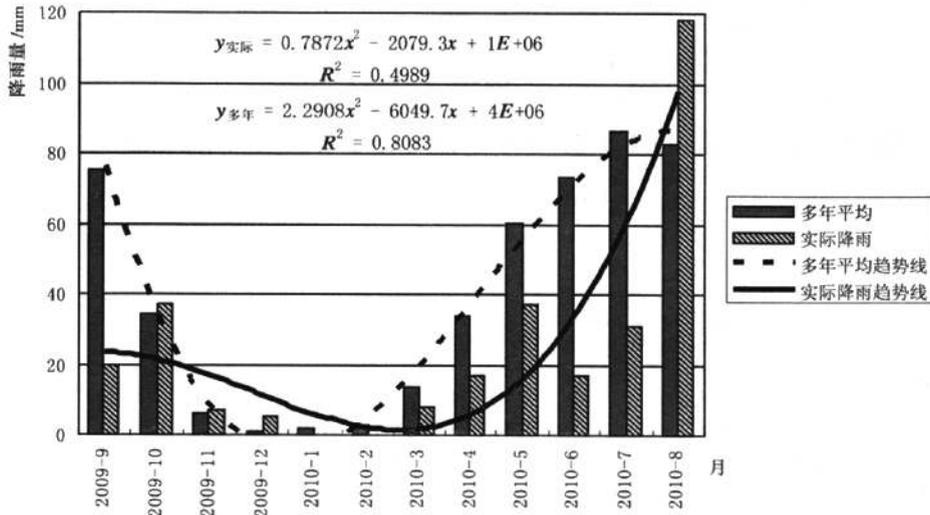


图6 甘肃省舟曲县2009-09—2010-06降雨量与多年平均降雨量对比图

Fig. 6 Comparison chart between the actual rainfall and the average annual rainfall from 2009-09 to 2010-06 in Zhouqu

4. 贵州关岭滑坡-碎屑流灾害链与甘肃舟曲泥石流-堰塞湖灾害链成灾演化前均经历了数月的干旱少雨条件,突然的强降雨更易激发大规模灾害链演化过程,链式连锁作用突出,阶段性、区段性特征明显。因此,久旱强降雨是灾害链预警和防控的关键时段。

参考文献 (References)

[1] Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. National geological disaster communications (January to August, 2010) [EB/OL]. [2010-09-14]. <http://www.cigem.gov.cn/ReadNews.asp?NewsID=35300> [中华人民共和国国土资源部. 全国地质灾害通报(2010年1—8月)[EB/OL]. [2010-09-14]. <http://www.cigem.gov.cn/ReadNews.asp?NewsID=35300>]

[2] Yao Qinglin. Field Effect and Regional Conversion as the Mechanism of Natural Hazard Chains [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2007, (3):31-36 [姚清林. 自然灾害链的场效机理与区链观[J]. 气象与减灾研究, 2007, (3):31-36]

[3] Guo Zengjian, Guo Anning, Zhou Kexing, et al. Physical Disaster Chain [M]. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 2007:127

-132 [郭增建,郭安宁,周可兴,等. 物理灾害链[M]. 西安:西安地图出版社,2007:127-132]

[4] Kong Jiming, Cui Yun, Tian Shujun, et al. Typical case study on the development characteristics of fragmentation-sliding seismic landslide [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, (3):119-124 [孔纪名,崔云,田述军,等. 地震碎裂滑动型滑坡发育特点及典型实例分析[J]. 四川大学学报:工程科学版,2009, (3):119-124]

[5] Men Kepei, Gao Jianguo. Severe disaster chain and its defense [J]. Progress in Geophysics, 2008, (1):270-275 [门可佩,高建国. 重大灾害链及其防御[J]. 地球物理学进展, 2008, (1):270-275]

[6] Wang Chenghua, Kong Jiming, Ma Qingwen. Landslides and its mitigation techniques [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2007:15-17 [王成华,孔纪名,马清文. 滑坡灾害及减灾技术[M]. 成都:四川科学技术出版社,2007:15-17]

[7] Kong Jiming, Chen Zisheng. 89.7 red landslides during rainstorm in Eastern Sichuan [M]//Landslide Collection Editorial. Board. Landslide Collection (IX). Beijing: China Railway Press 1992:36-42 [孔纪名,陈自生. 川东89.7暴雨过程中的红层滑坡[M]//滑坡文集编委会. 滑坡文集第九集. 北京:中国铁道出版社 1992:36-42]

[8] Zhang Kexiang. Guizhou Statistical Yearbook 2000 [M]. Beijing :

- China Statistics Press, 2000; 38 - 39 [张克湘. 贵州统计年鉴 2000 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2000; 38 - 39]
- [9] Wang Yuyi, Zhan Qiandeng, Hong Yong, et al. Analysis of Rheological characteristics of soil in source area of debris flow to answer process to rainfall [J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, (4): 457 - 465 [王裕宜, 詹钱登, 洪勇, 等. 泥石流源地土体应力应变特性对降雨响应过程的分析——以蒋家沟泥石流为例 [J]. *山地学报*, 2009, (4): 457 - 465]
- [10] Tao Jiayuan. The geographical distribution of debris flow in China [J]. *Journal of Higher Correspondence Education; Natural Sciences*, 1995, (4): 4 - 7 [陶家元. 中国泥石流灾害的地理分布 [J]. *高等函授学报: 自然科学版*, 1995, (4): 4 - 7]
- [11] Zhang Xusheng. *Gansu Statistical Yearbook 2000* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2000; 36 - 45 [张绪胜. *甘肃统计年鉴 2000* [M]. 北京: 中国统计出版社, 2000; 36 - 45]

The Critical Role for Heavy Rainfall in the Evolution of the Mountain Hazards Chains

CUI Yun^{1,2}, KONG Jiming¹, TIAN Shujun^{1,2}, A Fayou^{1,2}

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;*

2. *Graduated University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Experienced drought in 2009, the rainy season of 2010 became a high time in the evolution of mountain hazards in the mountains in western China which is because of the heavy rain playing a key role. Heavy rain expands the affected space of hazards and speed up the process of chain evolutionary. In order to analyze the key role of rainfall in the stimulating hazards chains evolution, mechanical model is built by landslide and debris flow as two key areas in hazards chains, then the result is verified by Guanling landslide-debris flow hazards chain and Zhouqu debris flow-dammed lake hazards chain. The final conclusions are: 1. landslides and debris flow is stimulated by heavy rainfall through a special water mechanism. 2. The period of strong rain after long drought is the key opportunity for early warning and control of the hazards chain.

Key words: Heavy rainfall; mountain hazards chains; Guanling landslide; Zhouqu debris flow

强降雨在山地灾害链成灾演化中的关键控制作用

作者: [崔云](#), [孔纪名](#), [田述军](#), [阿发友](#), [CUI Yun](#), [KONG Jiming](#), [TIAN Shujun](#), [A Fayou](#)
 作者单位: [崔云, 田述军, 阿发友, CUI Yun, TIAN Shujun, A Fayou \(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都610041; 中国科学院研究生院, 北京100049\)](#), [孔纪名, KONG Jiming \(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都, 610041\)](#)
 刊名: [山地学报](#) **ISTIC PKU**
 英文刊名: [JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE](#)
 年, 卷(期): 2011, 29(1)
 被引用次数: 1次

参考文献(11条)

1. 中华人民共和国国土资源部 [全国地质灾害通报\(2010年1-8月\)](#) 2010
2. [姚清林](#) [自然灾害链的场效机理与区链观](#)[期刊论文]-[气象与减灾研究](#) 2007(03)
3. [郭增建](#); [郭安宁](#); [周可兴](#) [物理灾害链](#) 2007
4. [孔纪名](#); [崔云](#); [田述军](#) [地震碎裂滑动型滑坡发育特点及典型实例分析](#)[期刊论文]-[四川大学学报\(工程科学版\)](#) 2009(03)
5. [门可佩](#); [高建国](#) [重大灾害链及其防御](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2008(01)
6. [王成华](#); [孔纪名](#); [马清文](#) [滑坡灾害及减灾技术](#) 2007
7. [孔纪名](#); [陈自生](#) [川东89.7暴雨过程中的红层滑坡](#) 1992
8. [张克湘](#) [贵州统计年鉴2000](#) 2000
9. [王裕宜](#); [詹钱登](#); [洪勇](#) [泥石流源地土体应力应变特性对降雨响应过程的分析--以蒋家沟泥石流为例](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2009(04)
10. [陶家元](#) [中国泥石流灾害的地理分布](#) 1995(04)
11. [张绪胜](#) [甘肃统计年鉴2000](#) 2000

本文读者也读过(10条)

1. [唐晓春](#) [四川5·12地震灾害链探讨](#)[会议论文]-2009
2. [余世舟](#); [张令心](#); [赵振东](#); [钟江荣](#) [地震灾害链概率分析及断链减灾方法](#)[会议论文]-2010
3. [尹成戊](#); [YIN Cheng-xu](#) [舟曲县水土保持设施灾后修复](#)[期刊论文]-[中国水土保持](#)2011(6)
4. [高思如](#); [郭安宁](#); [王兰民](#); [焦姣](#); [李鑫](#); [Gao Siru](#); [Guo Anning](#); [Wang Lanmin](#); [Jiao Jiao](#); [Li Xin](#) [龙羊峡水库地震溃坝的可能性及溃坝洪灾程度的分析](#)[期刊论文]-[灾害学](#)2011, 26(2)
5. [门可佩](#) [重大地震灾害链的时空有序性及其预测](#)[会议论文]-2006
6. [尹刚](#) [对路堑顺向滑坡分段治理方案的探讨--以贵州省关岭至兴仁二级公路K105+300~510段边坡治理工程为例](#)[期刊论文]-[贵州地质](#)2003, 20(2)
7. [袁多娜](#) [贵州移动:启动最高等级应急响应全力展开关岭滑坡救援通信保障](#)[期刊论文]-[当代贵州](#)2010(14)
8. [张成俭](#) [舟曲县白龙江流域地质环境及地质灾害分布特征](#)[期刊论文]-[甘肃水利水电技术](#)2010, 46(12)
9. [姚清林](#); [强祖基](#) [地震灾害链的机理过程与震-洪现象分析](#)[会议论文]-2006
10. [强祖基](#); [姚清林](#) [同一海域巨震为什么不总能引发海啸?](#)[会议论文]-2006

引证文献(2条)

1. [钟敦伦](#); [谢洪](#); [韦方强](#); [刘洪江](#); [汤家法](#) [论山地灾害链](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2013(3)
2. [唐兰](#); [陈洪凯](#) [甘肃舟曲特大泥石流灾害形成机制及减灾对策](#)[期刊论文]-[中国地质灾害与防治学报](#) 2012(2)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201101013.aspx