

山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法

崔 鹏^{1,3}, 邹 强²

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘 要:山洪泥石流是中国常见的自然灾害, 充分认识其形成机制与潜在风险是防灾减灾的关键。本文阐述了山洪泥石流形成机理, 以及风险分析与管理的方法和内容, 系统认识了地表产流流量激增、土体破坏物质供给激增、沟道堵塞级联溃决流量放大和动床侵蚀规模增大等4个山洪泥石流的形成过程, 介绍了基于动力过程的山洪泥石流风险评估方法和承灾体易损性评估方法, 构建了基于灾害动力过程的风险评估与风险制图方法。进而, 基于风险评估结果, 提出可用于具体灾害点减灾的风险管理内容和风险调控技术、灾害防治的工程与非工程措施与制技术方案。最后, 重点讨论了包括灾害风险预测、临灾预案、灾害防治工程方案等内容风险处置对策, 并形成一套基于山洪泥石流动力过程的风险评估与风险管理理论与方法体系。

关键词:泥石流; 山洪; 危险性; 易损性; 风险评估; 风险管理; 动力过程

1 引言

山洪和泥石流是山区小流域水土物质快速转移过程, 暴发突然, 破坏力强, 往往造成毁灭性灾害。活跃的地质构造、巨大的地形高差、季风气候带来的丰沛降雨、密集的人口分布和高强度的人类活动影响等因素的组合与叠加, 使得山洪和泥石流广泛发育于约占中国陆地面积2/3的山地, 频繁成灾, 损失巨大, 严重威胁广大山区人民生命财产和重大工程安全, 制约社会经济发展。

根据国家防洪抗旱总指挥部统计, 全国2058个县(市)有山洪和泥石流分布, 分布区面积达487万km², 受威胁人口达到5.7亿人。2010年8月8日甘肃省舟曲山洪泥石流就造成1765人死亡和失踪, 4321间房屋毁坏, 22667人无家可归; 2013年7月10日前后的降雨过程导致都江堰、汶川、北川等10个县(市)暴发大范围群发性山洪和泥石流, 导致

2.1×10⁴ km²范围内269个乡镇、118.7×10⁴人受灾, 毁坏房屋6975间, 直接经济损失114亿元, 共造成100余人死亡; 2013年8月16日辽宁清原特大型山洪灾害造成77人死亡, 直接经济损失76.34亿元。据涂勇等人统计(2013), 2013年全国24个省(自治区、直辖市)共发生了181起造成人员死亡的山洪灾害事件, 死亡774人, 山洪灾害死亡人数占洪涝灾害死亡人数比例为72.4%; 近十多年来, 全国因山洪和泥石流灾害造成的死亡人数占洪涝灾害死亡人数的比例呈增长趋势, 占比高达70%~90%(图1), 成为造成人员伤亡的主要灾种。

山洪泥石流灾情表明, 预防和减轻山洪泥石流是国家减灾战略的重要部分。从国际上看, 联合国减灾署2015年3月在日本仙台召开的第三届世界减灾大会上, 通过了《2015–2030年仙台减少灾害风险框架》, 力求在未来15年内大幅减少在生命、生计方面以及在经济、实物、社会、文化、环境资产方面

收稿日期: 2015-12; 修订日期: 2016-01。

基金项目: 国家自然科学基金国际合作与交流重点项目(41520104002); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05-01); 四川省科技计划项目(2014SZ0163) [Foundation: Key Project of International Cooperation and Exchanges NSFC, No.41520104002; Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.KZZD-EW-05-01; Science and Technology Project of Sichuan Province, No.2014SZ0163]。

作者简介: 崔鹏(1957-), 男, 陕西西安人, 中国科学院院士, 主要从事山地灾害与水土保持研究, E-mail: pengcui@imde.ac.cn。

引用格式: 崔鹏, 邹强. 2016. 山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法[J]. 地理科学进展, 35(2): 137-147. [Cui P, Zou Q. 2016. Theory and method of risk assessment and risk management of debris flows and flash floods[J]. Progress in Geography, 35(2): 137-147.]

DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.02.001

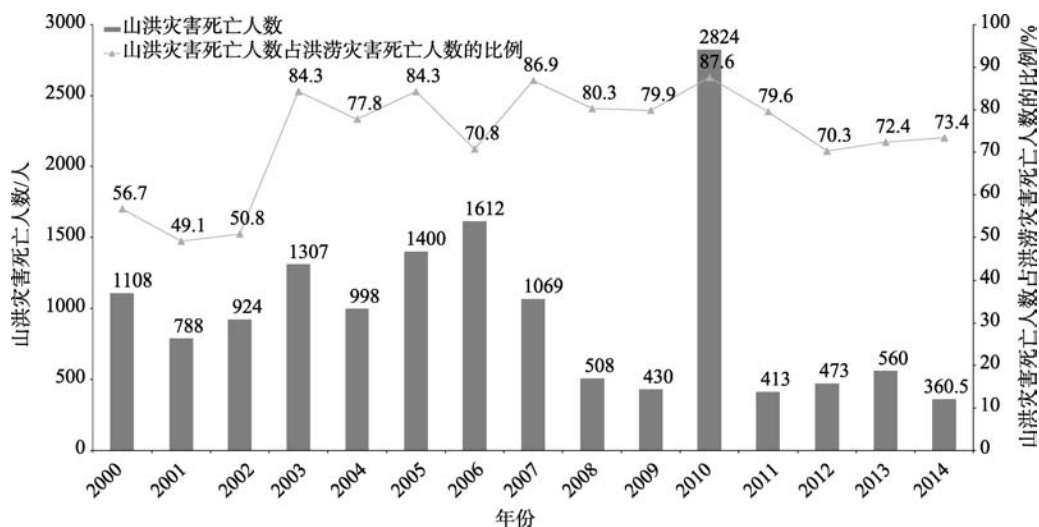


图1 2000-2014年山洪灾害死亡人数及其占洪涝灾害总死亡人数比例

(数据来源:国家防汛抗旱总指挥部等, 2013; 张志彤, 2015)

Fig.1 Casualties from flash flood disasters and their proportions in annual total casualties due to floods, 2000-2014

(Data source: The State Flood Control and Drought Relief Headquarters et al, 2013; Zhang, 2014)

的灾害风险和损失,采取包括经济、法律、社会、卫生、文化、环境、技术、政治和体制等综合措施,减少受灾体暴露程度和脆弱性,提高抗灾和灾后恢复能力(UN/ISDR, 2015)。新的国际减灾行动计划必将有力地促进山洪、泥石流灾害风险研究与减灾工作。

灾害风险评估是减灾的基础和依据。自然灾害风险评估旨在预测灾害期望损失值和评估灾害损失程度,不仅是减轻自然灾害损失的重要途径(UNDP, 2004; UN/ISDR, 2005),也为土地利用规划提供科学依据(AGS, 2007)。山洪和泥石流风险评估分为区域评估与灾点评估。区域评估主要依据灾害成因和承灾体的数量、质量与空间位置等信息,采用统计分析方法,分别确定灾害的危险度与成灾体的易损度,进而计算出风险值。区域评估的结果可以用于不同级别行政单元甚至全国和全球的危害风险管理,服务于不同级别的减灾规划和减灾方针政策制定。这方面的研究已经取得了突出进展,在国家层面减灾中发挥了重要作用(Huggel et al, 2003; Liu, 2003; Chau, 2004; Bisson et al, 2005; 史培军, 2005; Pradhan, 2010)。近年来考虑到承灾体的暴露性,对风险评估方法进行了新的改进,使得风险评估结果更加符合实际(葛全胜等, 2008; Fuchs, 2012; Cui, Zou et al, 2013; 邹强, 2014)。

由于区域风险评估是基于统计方法的因素分

析,对具体灾点的详细信息反映不足,评估结果难以应用到一个具体灾害点的临灾预案和减灾工程设计。对服务于具体灾点减灾工作的风险评估,需要进一步依据具体灾害的物理力学性质,考虑灾害的动力过程,开展灾害危险性分析与易损性分析,在此基础上计算该灾点的风险值并进行风险等级划分。我们把这种基于灾害体动力过程和灾害体与承灾结构体动力响应的风险分析方法,称为基于动力过程的风险评估。本文将介绍基于动力过程的风险评估方法以及在此基础上提出的社区灾害风险管理。

2 基于动力过程的风险评估

基于动力过程的灾害风险评估的核心科学问题,是基于灾害动力过程认识进行危险性分析和易损性分析。

2.1 山洪泥石流动力过程

山洪和泥石流都是水沙混合体在沟道中的快速运动过程。其形成与发展主要包括以下四个过程:①降雨在集水区产流并迅速汇聚形成沟道洪水;②水流冲蚀裹挟沟道内的松散固体物质形成泥石流;③在其沿着具有滑坡崩塌体堵塞段沟道的流动过程中,存在物质和能量暂时蓄积与瞬间释放过程,使得洪水或泥石流规模增大(Cui, Zhou et al,

2013a);④山洪和泥石流在较陡的沟道中高速运动,具有强烈的侵蚀冲刷能力和泥沙携带能力,侵蚀沟床并携带松散物质,不断补给物质而增大规模,随着物质和能量不断积累,最后形成具有较大破坏能力的洪流。山洪和泥石流形成发展的四个关键过程为:地表产流流量激增过程,土体破坏物质供给激增过程,沟道堵塞体级联溃决流量放大过程和动床侵蚀规模增大过程(图2)。

山洪和泥石流的破坏动力作用主要表现在高速运动的冲击作用、快速增大水位(流深)的洪水淹没和泥沙淤埋作用,还有对构筑物基础的冲刷和淘蚀作用。其中,冲击和淤埋(淹没)为最常见的破坏方式。

2.2 山洪泥石流数值模拟

流速是确定山洪和泥石流冲击破坏作用的关键参数,流深反映其淤埋或淹没程度。依据山洪和泥石流运动方程,通过动力学数值模拟方法,确定山洪与泥石流的危害范围、以及致险范围内流速和流深的时空分布,从而可依据动力参数确定其危险性。

山洪一般可视为清水或含沙水流,浅水波方程可以较好描述其运动过程。目前,基于运动波和扩散波近似的分布式水文模型能够预测山洪区域的内部水位、流速过程。但由于忽略了流动的力学因子,难以准确描述山洪的形成与演化过程。因此有必要发展完整的二维水动力学模型。传统数值计算格式难以准确计算激波等水流现象,曹志先团队等建立了新的多时间尺度山洪水沙数值模型,开辟了山洪数值模拟的新途径(王鑫等,2009)。该方法控制方程采用二维浅水波方程,包括质量守恒方程和动量守恒方程,考虑降雨和土壤入渗,构成如下守恒形式:

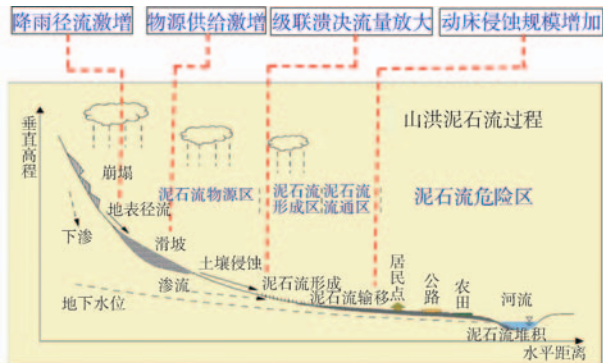


图2 山洪泥石流形成过程示意图

Fig.2 Formation process for torrential floods and debris flows

$$U_t + F(U)_x + G(U)_y = S(U) \quad (1)$$

式中: U 为守恒变量; $F(U)$ 、 $G(U)$ 为通量向量; $S(U)$ 为源项向量。方程中各项的定义如下:

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huv \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + gh^2/2 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} r-f \\ gh(S_{bx} - S_{fx}) \\ gh(S_{by} - S_{fy}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: h 为水深(m); (u, v) 为 (x, y) 方向的流速分量(m/s); g 为重力加速度(m/s²); r 为降雨强度(mm/h)或入流量(m³); f 为入渗强度(mm/h)或出流量(m³); $S_{bx} = -\partial z / \partial x$, $S_{by} = -\partial z / \partial y$,分别表示 x 和 y 方向的坡面比降(‰); z 为地表高程(m); S_{fx} 和 S_{fy} 分别为 x 和 y 方向的阻力坡度(°),采用明渠水流阻力公式;入渗强度采用Green-Ampt公式计算(Smith et al, 2002):

$$f = \frac{dF}{dt} = K_s \left(1 + \frac{(\theta_s + \theta_i)H_c}{F} \right) \quad (3)$$

式中: K_s 为土壤饱和入渗率(mm/h); H_c 为土壤吸力(m); θ_s 、 θ_i 分别为饱和、初始含水量(%); F 为累积入渗深度(m)。

泥石流为多相流体,其动力学过程比较复杂,需要通过假设简化,建立动力学方程,实现数值模拟。通常采用基于Saint-Venant方程的泥石流运动方程,该方程只包含三个重要变量——泥深、 x 方向的速度、 y 方向的速度,可以忽略密度的变化和压力的作用。在泥石流数值模拟中,一般只需要考虑泥石流体的动量守恒方程。在Lagrange坐标系中,泥石流运动方程可写成:

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} &= gS_{sx} - gS_{fx} \\ \frac{Dv}{Dt} &= gS_{sy} - gS_{fy} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: S_{sx} 与 S_{sy} 分别是 x 和 y 方向泥石流堆积区底面坡降(‰); S_{fx} 和 S_{fy} 采用O'Brien等(1993)的摩阻坡降公式:

$$\begin{aligned} S_{fx} &= \frac{\tau_b}{\gamma_m h} \operatorname{sgn}(u) + \frac{2\mu_b u}{\gamma_m h^2} + \frac{k_c u \sqrt{u^2 + v^2}}{gh} \\ S_{fy} &= \frac{\tau_b}{\gamma_m h} \operatorname{sgn}(v) + \frac{2\mu_b v}{\gamma_m h^2} + \frac{k_c v \sqrt{u^2 + v^2}}{gh} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: τ_b 为屈服应力(N/m²); γ_m 为泥石流密度(kg/m³); h 为泥石流淤埋深度(m); μ_b 为泥石流粘滞系数(N·s/m²); k_c 为糙率系数。右边第1项反映了屈服应

力对阻力的贡献,第2项反映了粘性应力对阻力的贡献,第3项反映了碰撞应力对阻力的贡献。

模拟计算时把整个区域划分成正方形的网格,对每个交叉点(网格的角点)计算流深、速度值及高程值,作为危险性的评价因子。

2.3 基于动力过程的危险性分析

山洪致灾作用主要有:水位陡涨导致的淹没危害、携带大量泥沙产生的淤埋危害、水流对构筑物基础的冲蚀。泥石流致灾作用主要有对承灾体的冲击、淤埋和冲蚀作用。冲蚀作用是山洪和泥石流作用在具体建筑物上的危害方式,在对具体工程结构体的安全性分析时需要精确计算,在进行不针对具体结构体安全性计算而主要描述灾害的危害能力时,为了简化计算,可以暂时不考虑冲刷作用,只考虑冲击作用、淤埋作用和淹没作用。

(1) 泥石流淤埋深度的确定方法

用泥石流运动过程中的最大流深来表征泥石流的淤积危害。在泥石流运动模拟计算中,每个计算网格(i, j)的流深由网格内的所有颗粒体积除以网格面积得到(Cui et al, 2011),计算公式如下:

$$H_d = \frac{\max_{t>0} (N_{ij} \Delta V)}{A} \quad (6)$$

式中: H_d 为泥石流淤埋深度(m),其值越大,泥石流危险性越大; N_{ij} 等于以点(i, j)为中心的控制格网内的颗粒数; ΔV 为颗粒的体积(m^3); A 是数值模拟采用的网格面积(m^2); t 为数值模拟时间(s)。

(2) 泥石流冲击破坏能力的确定方法

用泥石流运动过程中的最大动能来表征泥石流的冲击破坏能力。采用每个网格在泥石流运动全过程中的最大动能值,反映各网格最大冲击作用产生的危险性,计算公式如下:

$$E_d = A \cdot \max_{t>0} [(u^2 + v^2) h \rho] \quad (7)$$

式中: E_d 为泥石流最大动能; A 为数值模拟采用的网格的面积(m^2); u, v 分别是 x, y 方向的速度(m/s); h 为泥石流流深(m); ρ 为泥石流密度(kg/m^3); t 为数值模拟时间(s)。

(3) 洪水淹没破坏能力的确定方法

用洪水运动过程中山洪的最大动量来表示山洪的淹没破坏能力。基于山洪运动过程的数值模拟,获得计算网格单元的山洪流速与水深值,通过式(8)即可计算洪水的最大动量。

$$H_f = A \cdot \max_{t>0} [\rho \cdot v \cdot h] \quad (8)$$

式中: H_f 为任一计算网格的动量(m^2/s); A 为数值模拟采用的网格的面积(m^2); ρ 为山洪密度(kg/m^3); v 为任一计算网格洪水流速(m/s); h 为任一计算网格洪水淹没深度(m); t 为数值模拟时间(s)。

根据承灾体与流深(泥石流淤埋高度和洪水水位)的相对高度,可以确定是否受到山洪或泥石流的威胁及其危险程度。泥石流的危害作用除了冲击和淤埋危害之外,大规模泥石流堵江后还会导致上游淹没和下游溃决洪水灾害,这种灾害链的复合致灾作用主要表现为水的淹没。反映这种淹没的危险性可用山洪的危险度计算方法确定,但在危险性评估时需要与泥石流本身的冲击与淤埋危险性相结合。

基于山洪和泥石流动力过程的数值模拟,可求算泥石流冲毁、淤埋以及洪水淹没的动力学参数量值;结合山洪、泥石流危险性分析方法,利用GIS技术的空间分析技术,进一步确定泥石流冲击破坏能力、泥石流淤埋深度以及洪水淹没破坏能力的空间分布,从而进行危险性分区。考虑灾害的复合致灾作用,一般上游堰塞湖溃决在泥石流堆积之后,在计算溃决洪水淹没范围时,首先利用胡凯衡等(2005)和Cui等(2011)提出的方法,计算泥石流的堆积范围和堆积厚度,再把被泥石流堆积改变以后的地形作为输入条件,计算上游堰塞湖溃决洪水的淹没范围和淹没深度。在进行危险性分区时,对于同时受到泥石流淤埋和洪水淹没的区域,则选取危害最重者作为该区的危险性评估依据。

2.4 基于动力过程的易损性分析

山洪和泥石流灾害易损性分析是对承灾体抗灾能力的综合分析。承灾体易损度大小取决于承灾体对山洪、泥石流作用的敏感程度,通常用承灾体的价值(或数量)及其脆弱性指数来表示。承灾体的易损度可以描述为:

$$V = V(u) \times C \quad (9)$$

式中: V 为承灾体的易损度; $V(u)$ 为承灾体的综合价值; C 为承灾体的脆弱性指数。

承灾体的综合价值可以通过承灾体的平均单价 P 和受灾的实际数量 N 计算获得。承灾体脆弱性是描述承灾体受到灾害侵袭时损毁的难易程度,可用介于0和1之间的数表示,数值越大越易损毁。承灾体脆弱性的定量描述比较复杂,主要受承灾体自身的结构强度与山洪、泥石流破坏形式的影响。

如承灾体相对泥石流位置不同,受损的方式不同,在泥石流主流线上的建筑物和构筑物主要受到冲击危害;位于泥石流边缘或扇形地前缘者,则主要受到淤埋危害。对于被淤埋的承灾体,多数难以再利用,即使结构完好,由于地形改变也很难再发挥原来设计的功效。为此,以房屋和构筑物为例说明承灾体的脆弱性计算方法。

对于受淤埋危害的承灾体,脆弱性指数 C_d 定义为其几何高度与淤埋深度的比值,即

$$C_d = \frac{H_d}{H_c} \tag{10}$$

式中: H_d 为泥石流淤埋深度(m); H_c 为建筑物或构筑物有效高度(m),如桥面、房屋等的高度。当 $\frac{H_d}{H_c} \geq 1$ 时,表示建筑物或构筑物已经完全被泥石流淤埋, C_d 值取1。

对于受到冲击的承灾体(建筑物或构筑物),其脆弱性指数 C_e 可通过泥石流最大动能 E_d 与建筑物或构筑物的结构强度 E_c 之比来确定,即:

$$C_e = \frac{E_d}{E_c} \tag{11}$$

当 $\frac{E_d}{E_c} \geq 1$ 时,表示建筑物或构筑物已经完全被泥石流冲毁, C_e 值取1。

2.5 风险评估与风险制图

(1) 风险度计算

山洪和泥石流风险评估是对风险的定性或定量计算,其结果可为风险管理提供依据,用于指导灾害风险处置与决策等。在灾害危险性和易损性分析结果的基础上,根据灾害风险的定义(UN-DHA, 1992)计算每个评估单元的风险值:

$$R = H \times V \tag{12}$$

式中: R 为评估单元的风险性指标值; H 为评估单元的危险性指标值; V 为评估单元的易损性指标值。在计算以前,式(12)中各类指数均需经过归一化处理。归一化处理方法如下:

$$\begin{aligned} H' &= (H - H_{\min}) / (H_{\max} - H_{\min}) \\ V' &= (V - V_{\min}) / (V_{\max} - V_{\min}) \end{aligned} \tag{13}$$

式中: H' 是危险度的归一化值, H 是危险度指标值, H_{\max} 和 H_{\min} 分别为最大危险度值和最小危险度值; V' 为易损度的归一化值, V 为易损度指标值, V_{\max} 和 V_{\min} 分别为最大易损度值和最小易损度值。

(2) 风险分级

计算出每个评估单元的风险值以后,还需要对

风险度进行等级划分。危险度、易损度和风险度计算值的分级方法通常有等间距法、分位数法、标准差法和自然断点法。其中标准差法适用于符合正态分布规律的数值;而等间距法、分位数法和自然断点法均具有较好制图效果,得到广泛应用。风险分级时,依据灾害风险特征,选取适合的分级方法寻找数据集的自然转折点和特征点对评估结果进行等级划分。结合风险管理的目标,一般将风险度划分为高度风险、中度风险、低度风险和微度风险四个等级,各个等级风险特征描述如表1所示。

(3) 风险制图

山洪和泥石流风险制图过程中,风险度分布、风险等级、风险区位置是风险制图中的关键因素。以危险性与易损性的分析结果为基础,应用GIS的地图代数功能进行栅格数值计算,获得研究区风险度分布,用不同颜色表示各风险等级,合并相同风险级别的栅格单元,结合ArcGIS多边形构面方法,完成山洪、泥石流灾害风险分区图。风险制图的流程见图3。

2.6 研究实例——清平场镇泥石流风险评估

清平场镇位于四川省绵竹市西北部山区。2010年“8.13”泥石流在清平场镇形成了长3.5 km,宽400~500 m,平均厚度约5 m(最大厚度超13 m),总土石方量约 $600 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的淤积区(图4)。泥石流造成7人遇难,5人失踪,33人受伤;379户房屋严重受损,占总户数的20.9%,其中,205户房屋全部淹没,75户房屋部分淹没,99户房屋进水。

根据野外勘测与调查,分析泥石流堆积物样

表1 山洪泥石流风险分级及特征描述
Tab.1 Risk classification and characteristics of debris flows and flash floods

风险编号	风险等级	空间分布与危害特征
I	微度风险	山洪、泥石流分布极少,规模很小,其危险度与易损度均很低,受危害导致损毁的风险很小,一般不影响正常生产和生活。
II	低度风险	山洪、泥石流分布少,规模不大,承灾体易损度较低,遭受轻度危害,破坏小,灾害综合风险值较低,需要采取一定预防措施。
III	中度风险	山洪、泥石流分布较广泛,规模较大,承灾体易损度较高,灾害危害较重,灾害风险水平为中等,需布设灾害防治措施以保障生产和生活安全。
IV	高度风险	山洪、泥石流分布广泛,规模大,破坏力强,危险性与易损度均较高,风险很高,频繁受灾,严重影响生产和生活,应实施综合减灾工程,加强风险管理。

品,确定出这些沟谷的泥石流基本物理力学参数,如底床坡度、沟床糙率、流动时间、流团大小、粘滞系数、屈服应力等,结合清平场镇的地形数据,模拟

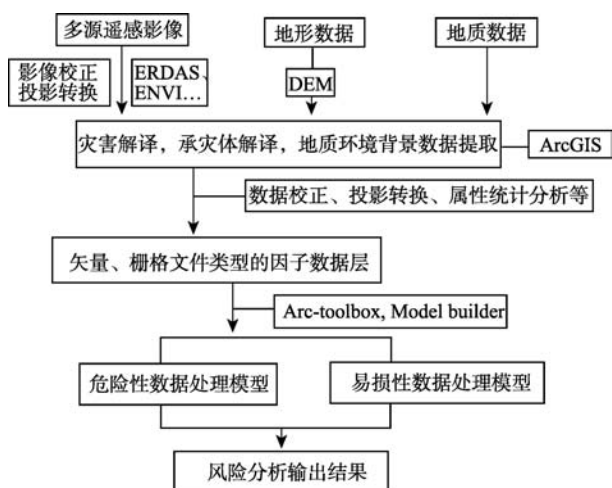


图3 山洪泥石流风险制图流程

Fig.3 Flow chart of risk assessment for debris flows and flash floods

2010年“8·13”泥石流在堆积扇区的运动过程。通过对泥石流运动过程的模拟,可以获取堆积区每个模拟计算网格的流速、流深数据。经过 ArcGIS 栅格-矢量数据转换即可获取泥石流堆积范围。比较数值模拟的堆积范围与场镇受灾分布,泥石流对场镇实际危害的面积为 $148.2345 \times 10^4 \text{ m}^2$,而模拟的受泥石流影响范围的面积为 $143.9488 \times 10^4 \text{ m}^2$,模拟值较实际值小 2.9%。

在清平场镇危险性与易损性分析结果的基础上,基于式(13)对危险度和易损度进行归一化处理,利用式(12)的计算方法,通过泥石流危险性归一化数据与承灾体易损性归一化数据进行乘积运算,获取研究区的泥石流风险度。依据风险分级,并用不同图斑表示各风险等级的区域,合并相同风险级别的栅格单元,编制清平场镇泥石流灾害风险分区图(图5)。结果表明:泥石流危险区内,高风险区面积约 $83.7 \times 10^4 \text{ m}^2$,占研究区总面积的 33.4%;中风险区面积 $79.2 \times 10^4 \text{ m}^2$,占研究区面积的 31.6%;低风险区



图4 2010年四川省清平场镇遭受“8·13”特大泥石流危害影像图(影像来源:四川省国土资源厅)

Fig.4 Debris flow disaster in Qingping Township in Sichuan Province on 13 August 2010 (Image from: Land and Resources Department of Sichuan Province)

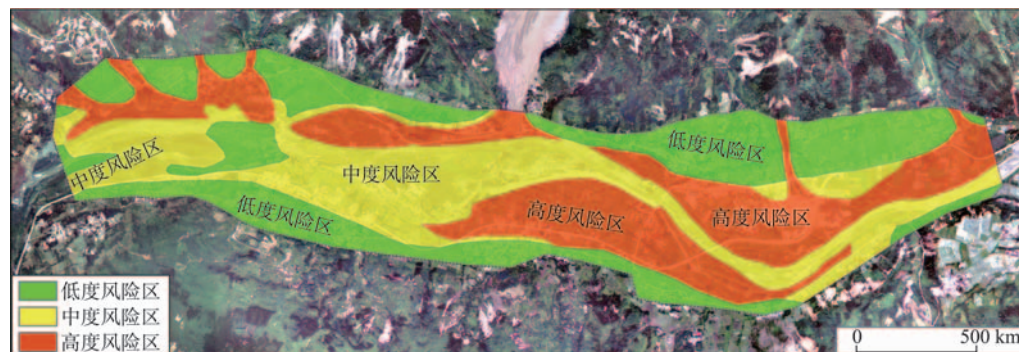


图5 清平场镇风险分区结果

Fig.5 Risk map of Qingping Township

面积 $87.5 \times 10^4 \text{ m}^2$, 占研究区总面积35.0%。经野外调查验证, 风险分区结果与清平场镇泥石流承灾体的分布情况及危害严重程度比较吻合, 评价结果与实际情况基本一致(Cui, Zou et al, 2013b)。

3 风险管理

3.1 山洪泥石流风险管理内容

灾害风险管理(disaster risk management)是在对灾害风险形成过程与机理(致灾体成因、力学机理、运动规律、成灾机制)系统认识的基础上, 根据不同类型灾害的物理特性及其成灾特点, 评估可能产生的灾害风险, 采用适宜的风险调控措施(预案、预防、预警与治理措施), 最大限度地减少灾害风险和可能损失的手段。它贯穿于灾害发生发展的全过程, 涉及防灾、备灾、预警、响应(应急和救助)、处置(治理)和恢复/重建等内容, 是在以往灾害防治理念基础上发展的一项自然规律与人类认知、工程技术与社会管理融合的系统工程。

山洪和泥石流风险管理的目的是认识灾害规律, 协调人与山地环境的关系, 在适度风险范围内规范山洪与泥石流灾害调控行为, 增强人类适应与抗灾能力(resilience), 合理利用灾害资源以满足社会经济可持续发展需要。

风险管理是当前山洪和泥石流灾害管理研究的重要课题。基于灾害风险理论及国内外相关研究成果(Blaikie et al, 2004; UN/ISDR, 2004; 史培军等, 2005; 崔鹏, 2014), 山洪和泥石流风险管理主要包括灾害风险辨识、风险分析与评估、风险决策与处理等三方面的内容。

(1) 灾害风险辨识。是指对尚未发生灾害或具有潜在灾害形成客观条件的集水区, 进行系统调查, 分析影响山洪和泥石流灾害风险的各种因素, 确定灾害形成的基本条件, 辨识风险源, 推断和预测灾害风险关键因素与可能风险的程度。

(2) 风险分析与评估。包括山洪和泥石流灾害危险性分析、承灾体易损性分析和风险评估三个方面。危险性分析主要针对孕灾环境和致灾因子, 分析山洪和泥石流灾害形成因素, 研究其动力过程, 分析可能受灾害影响的范围、强度和频率(概率)。承灾体易损性分析主要研究承灾体遭受不同类型和强度山洪、泥石流袭击的动力响应, 并综合分析

承灾体抗灾能力, 包括暴露要素分析、脆弱性分析、易损曲线分析等, 确定易损度。风险评估是在危险性分析和易损性分析的基础上, 估算不同强度和频率山洪、泥石流可能造成的风险损失, 并进行风险等级划分, 编制风险图。

(3) 风险决策与处置。根据山洪和泥石流灾害风险管理的目标, 在灾害风险辨识和风险评估的基础上, 确定可以接受的风险度, 进行可能风险与可接受风险水平的权衡, 做出应对风险的决策。综合考虑投资—收益与实施条件, 从可以采取的减灾技术与途径(避难搬迁、监测预警、预防措施、治理工程、居民点规划与重建等)中选择适宜的措施与措施组合, 综合制定风险处置方案, 包括临预案与灾害防治工程方案, 有效控制灾害风险。进而, 通过政策、教育和社会管理等手段, 提高受灾区域居民的减灾知识与防灾意识, 形成有效的鼓励、激励和保障机制, 构建高效的组织管理模式, 使得政府减灾部门、减灾专家和社区居民形成有机配合的协调一致并可持续的减灾管理体系, 保障风险决策和风险处置方案发挥最好的减灾作用, 取得理想的风险调控成效。

在风险管理内容中, 基于动力过程的灾害风险评估可以直接服务于居民点建设与防灾规划, 居民参与式社区灾害风险管理是新的研究课题。

3.2 风险处置对策

本文重点讨论基于山洪、泥石流动力过程灾害风险评估结果的风险处置对策, 主要包括: 基于动力过程的灾害风险预测、科学合理的临灾预案和灾害防治工程方案。

(1) 基于动力过程的灾害风险预测

通过山洪、泥石流的动力学模拟方法, 计算山洪和泥石流的致险范围内流速和流深的时空分布, 确定其危险性。通过危险区内不同位置、不同类型承灾体的综合抗灾能力调查分析, 确定易损度。在危险性分析和易损性分析的基础上, 估算不同强度和频率山洪、泥石流可能危害的区域与潜在风险损失, 并进行风险等级划分, 编制风险图。根据调查的山洪、泥石流堆(冲)积扇形态与危害特征, 以山洪和泥石流主流线为沟口堆积扇中轴线, 可通过极坐标的形式来表达堆(冲)积扇上承灾体的空间分布(图6)(曾超, 2014)及其可能的风险, 预测山洪和泥石流在不同等级风险区内灾害损失, 为制定科学合

理的土地利用规划与防灾方案提供科学依据。

(2) 制定合理的临灾预案

山洪和泥石流灾害临灾预案要求:一要调查确定山洪和泥石流灾害的基本情况,包括灾害危险区、风险等级等;二要针对不同风险级别区,制定灾害的应急措施,明确不同危险等级灾害点监测内容、巡查要求、预警方式、临灾抢险救灾措施、疏散撤离路线等;三要明确组织指挥机构和抢险救灾队伍,公布责任人员名单和联系电话;四要明确灾害应急队伍人员分工与职责。临灾预案需通过宣传、教育、培训、综合演练等方式不断提高公众对临灾预案的知晓度,要采用居民喜闻乐见的方式(挂图、影像、卡片等)提高群众的防灾减灾意识,充分发动群众参与社区防灾减灾,认真贯彻落实临灾预案,加强群测群防和群专结合的减灾管理,落实联防机制。

(3) 建立灾害综合防治工程方案

山洪和泥石流灾害防治是对一个流域内水—土物质的综合调控。根据流域灾害发育规律和运动特征,提出了“坡面防护—支沟的稳坡固沟—主沟的拦挡调节—沟口的排导防护”的基于物质与能量过程调控的小流域山洪、泥石流灾害综合治理技术体系(图7)。具体工程措施主要包括:通过改善地表产汇流条件,减少降雨过多渗入土层,控制坡面产流和汇流过程,消减沟道洪峰,从而控制流水侵蚀动力作用;通过稳定坡脚和坡体,防治滑坡崩塌产生,减少固体物质供给;通过沟道拦挡和排导,减小泥石流的规模和破坏作用,减轻灾害风险。

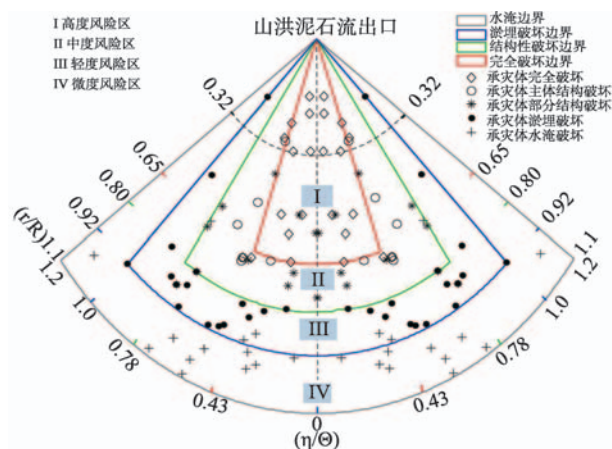


图6 山洪和泥石流堆(冲)积扇上承灾体的分布与风险区
Fig.6 Distribution of exposure units in at-risk area of debris flows and flash floods

3.3 社区风险管理

目前,社区参与式灾害风险管理是一种有效的灾害管理模式(图8),这种“自下而上”的灾害管理体制,重在提高社区居民的防灾认知、防灾减灾能力建设和灾害风险管理水平。《兵庫行动框架协议》指出了社区减灾的重要作用,强调要利用知识、创新和教育建立一个安全的、在各个层面对灾害具有适应力的文化(UN/ISDR, 2005)。社区灾害风险管理的挑战之一是保持社区层面防灾减灾的持久化(Mano, 2011)。因此,如何建立长效的社会参与激励机制,营造居民自觉参与社区灾害风险管理全过程的文化氛围,探索政府主导的“自上而下”型和发挥风险社区居民自觉性的“自下而上”型相结合的社区参与式灾害风险管理模式,是值得进一步探索的重要课题。

4 结论与讨论

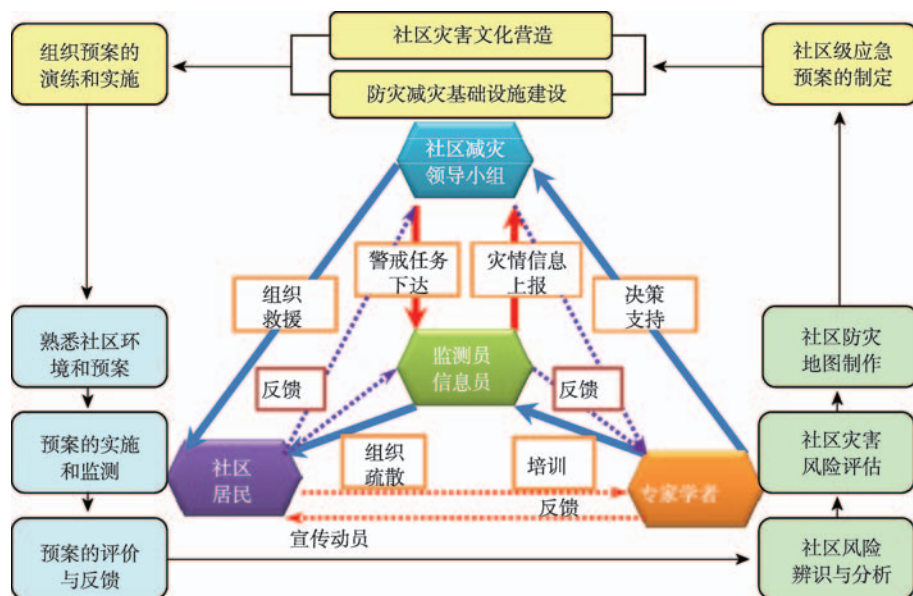
4.1 结论

(1) 认识山洪和泥石流形成过程与机理对防灾减灾具有重要意义。本文分析了山洪和泥石流的演化过程,阐述了四个关键形成演化过程:即地表产流流量激增过程、土体破坏物质供给激增过程、沟道堵塞体级联溃决流量放大过程和动床侵蚀规模增大过程。

(2) 山洪和泥石流风险评估分为区域评估与灾点评估。区域风险评估对具体灾点的详细信息反映不足,评估结果难以满足一个具体灾害点的临灾



图7 山洪和泥石流灾害综合治理技术体系
Fig.7 Engineering and biological control measures for debris flows and flash floods



- Republic of China. 2013. Bulletin of flood and drought disasters in China, 2013[M]. Beijing: China: Water & Power Press.]
- 胡凯衡, 韦方强. 2005. 基于数值模拟的泥石流危险性分区方法[J]. 自然灾害学报, 14(1): 10-14. [Hu K H, Wei F Q. 2005. Numerical-simulation-based debris flow risk zoning [J]. Journal of Natural Disasters, 14(1): 10-14.]
- 史培军. 2005. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 14(6): 1-7. [Shi P J. 2005. Theory and practice on disaster system research in a fourth time[J]. Journal of Natural Disasters, 14(6): 1-7.]
- 史培军, 邹铭, 李保俊, 等. 2005. 从区域安全建设到风险管理体系的形成: 从第一届世界风险大会看灾害与风险研究的现状与发展趋向[J]. 地球科学进展, 20(2): 173-179. [Shi P J, Zou M, Li B J, et al. 2005. Regional safety construction and risk management system: the actuality and trend of the study of disaster and risk based on the world congress on risk[J]. Advances in Earth Science, 20(2): 173-179.]
- 涂勇, 何秉顺, 褚明华, 等. 2014. 2013年全国山洪灾害特征分析[J]. 中国水利, (18): 18-22. [Tu Y, He B S, Chu M H, et al. 2014. Characteristics of mountain flood disasters in 2013[J]. China Water Resources, (18): 18-22.]
- 王鑫, 曹志先, 岳志远. 2009. 强不规则地形上浅水二维流动的数值计算研究[J]. 水动力学研究与进展, 24(1): 56-62. [Wang X, Cao Z X, Yue Z Y. 2009. Numerical modeling of shallow flows over irregular topography[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. A), 24(1): 56-62.]
- 曾超. 2014. 泥石流作用下建筑物易损性评价方法[D]. 成都: 中国科学院大学. [Zeng C. 2014. Vulnerability assessment of building to debris flow hazard[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 张志彤. 2015. 关于2014年防汛抗旱工作的报告[J]. 中国防汛抗旱, 25(1): 8-13. [Zhang Z T. 2015. Guanyu 2014 nian fangxun kanghan gongzuo de baogao, 25(1): 8-13.]
- 邹强. 2014. 川藏公路泥石流灾害风险分析[D]. 成都: 中国科学院大学. [Zou Q. 2014. Risk analysis of debris flows along Sichuan-Tibet highways[D]. Chengdu, China: University of Chinese Academy of Sciences.]
- AGS. 2007. Commentary on guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use management [R]. Australian: Australian Geomechanics Society Landslide Task force Landslide Zoning Working Group, 42(1): 37-62.
- Bisson M, Favalli M, Fornaciai A, et al. 2005. A rapid method to assess fire-related debris flow hazard in the Mediterranean region: an example from Sicily (southern Italy) [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 7(3): 217-231.
- Blaikie P, Cannon T, Davis I, et al. 2004. At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters[M]. New York: Roublisher Press.
- Chau K T, Lo K H. 2004. Hazard assessment of debris flows for Leung King Estate of Hong Kong by incorporating GIS with numerical simulations[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 4(1): 103-116.
- Cui P, Hu K H, Zhang J Q, et al. 2011. Prediction of the debris-flow danger area by combining hydrological and inundation simulation methods[J]. Journal of Mountain Science, 8(1): 1-9.
- Cui P, Zhou G G D, Zhu X H, et al. 2013. Scale amplification of natural debris flows caused by cascading landslide dam failures[J]. Geomorphology, 182: 173-189.
- Cui P, Zou Q, Xiang L Z, et al. 2013. Risk assessment of simultaneous debris flows in mountain townships[J]. Progress in Physical Geography, 37(4): 516-542.
- Fuchs S, Orntsmüller C, Totschnig R. 2012. Spatial scan statistics in vulnerability assessment: an application to mountain hazards[J]. Natural Hazards, 64(3): 2129-2151.
- Huggel C, Käab A, Haeberli W, et al. 2003. Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps [J]. Natural Hazards and Earth System Science, 3(6): 647-662.
- Liu X L, Lei J Z. 2003. A method for assessing regional debris flow risk: an application in Zhaotong of Yunnan province (SW China)[J]. Geomorphology, 52(3-4): 181-191.
- Mano T. 2011. Community-based disaster management and public awareness[R]. Disaster Risk Vulnerablity Conference. New Delhi, India: Mahatma Gandhi University.
- O'Brien J S, Julien P Y, Fullerton W T. 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 119(2): 244-261.
- Pradhan B. 2010. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia[J]. Advances in Space Research, 45(10): 1244-1256.
- Smith R E, Smettem K R J, Broadbridge P, et al. 2002. Infiltration theory for hydrologic applications[M]. Washington DC: American Geophysical Union.
- UN/ISDR (United National International Strategy for Disaster

- Reduction). 2004. Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives[M]. Geneva: United Nations Publications.
- UN/ISDR (The United Nations Office for Disaster Risk Reduction). 2005. Hyogo framework for action 2005- 2015: building the resilience of nations and communities to disasters[R]. Kobe, Hyogo, Japan: UN World Conference on Disaster Risk Reduction.
- UN/ISDR (The United Nations Office for Disaster Risk Reduction). 2015. Sendai framework for action 2015- 2030: building the resilience of nations and communities to disasters[R]. Sendai, Japan: Third UN World Conference on Disaster Risk Reduction.
- UNDHA (United Nations, Department of Humanitarian Affairs). 1992. Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management[R]. Geneva: United Nations Department of Humanitarian Affairs.
- UNDP (United Nations Development Program). 2004. A global report reducing disaster risk: a challenge for development[R]. New York: UNDP, 1-14.

Theory and method of risk assessment and risk management of debris flows and flash floods

CUI Peng^{1,3}, ZOU Qiang²

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process/Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 2. School of Environmental and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China; 3. Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Debris flows and flash floods are widely distributed mountain hazards in China. Effective hazard mitigation and prevention require understanding of hazards formation mechanisms and their potential risks. This article elaborates on the formation mechanism, risk analysis, and risk management of debris flows and flash floods. Surface runoff and material supply volume incensement, hazard scale amplification due to outburst of multiple channel blockages and bed erosion as hazard formation mechanism are discussed. Base on the dynamic process of debris flows and flash floods as well as vulnerability assessment of elements at risk, methods of risk assessment and mapping are proposed. Comprehensive engineering and non-engineering measures for hazards control shall be guided by the result of risk analysis that identifies the hazardous level of debris flows and flash floods and incorporates the vulnerability of different elements at risk. Finally, this article discusses strategies when facing risk of these hazards and puts forward a risk management system that involves the participation of local communities.

Key words: debris flow; flash flood; hazard analysis; vulnerability; risk assessment; risk management; dynamic process