

文章编号: 1008-2786-(2010)4-444-09

玉树地震后结古镇群发式泥石流灾害数值模拟 及危险性分析

刘洪江^{1,2}, 兰恒星^{1*}, 程维明¹

(1. 中国科学院资源环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 云南财经大学城市管理与资源环境学院, 云南 昆明 650223)

摘要: 青海省玉树州结古镇北山的5条泥石流沟曾在2003—07发生过群发式泥石流灾害。强烈地震发生后的5~10^a是泥石流的高发期。2010—04—14(简称“4·14”)玉树地震使结古镇周围山体出现大量崩塌、滑坡, 为后期群发式泥石流灾害发育提供了丰富的固体物源。根据国务院划定的结古镇地震灾害重建规划范围及野外考察资料, 在GIS环境下, 采用对泥石流运动方程进行求解, 并结合泥石流运动过程中的地形、坡度、沟道、流量过程、含沙量等信息, 对结古镇重建区范围内的17条沟进行了泥石流运动—淤积过程数值模拟。对模拟结果的分析表明, 结古镇灾后重建区受泥石流威胁极大, 泥石流到达结古镇后, 其最大流速、泥深及能量仍具有较大破坏性; 对现有老城区威胁严重的泥石流沟是结古陇巴和德念陇巴, 对规划新区具有严重威胁的泥石流沟是热翁陇、上尖果陇、下尖果陇以及显子陇, 扎曲河部分河段有被泥石流堵断的危险。建议在重建规划中对泥石流沟进行工程治理, 保障“新玉树, 新结古”灾后重建的安全。

关键词: 玉树地震; 结古镇; 泥石流; 数值模拟; 群发式; 山地灾害

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

2010—04—14 T07:49 位于青海省玉树藏族自治州(简称玉树州)玉树县城西北的郭达央宗附近发生M_s7.1级地震, 根据中国地震台网中心公布的数据, 震中位置为33°12′N 96°36′E震源深度14 km。截至2010—04—25 T17:00, 玉树地震共导致2 220人遇难, 70人失踪。地震造成大量民房倒塌, 地表破裂带穿过玉树州政府所在地结古镇, 使其成为重灾区, 沿地震地表破裂带出现大量表层土体崩塌及滑坡群, 在即将来临的雨季暴雨及冻融作用下, 极易形成区域性大规模群发式泥石流灾害。

强烈地震发生后的5~10^a是地震区区域性泥石流活跃的高峰期。由于激发泥石流的降雨阈值降低, 在区域性暴雨作用下, 尤其容易暴发区域性群发式泥石流灾害, 造成极为严重的损失, 如在“5.12”

汶川地震后地震重灾区的区域泥石流活动进入了新一轮的暴发高峰期^[1,2], 其中2008—09—24暴雨泥石流使北川县等地暴发大规模群发泥石流灾害, 仅魏家沟泥石流就导致42人死亡/失踪, 泥石流淤埋、破坏了北川县城地震遗址原政府大楼、粮食局等大部分建筑^[3]。我国其他地震区, 如松潘—平武地震后也引起了后期大规模的泥石流灾害。因此强震后预防泥石流灾害是十分重要的。

在泥石流的预防上, 国际上的经验通常是采用实地调查和灾害定量精细评估的方法, 并结合当地实情进行危险性划分及后期的灾害整治。其中一个重要方法是利用模型对泥石流过程的数值模拟, 这种方法在北美、欧洲、香港等山地灾害研究水平较高的国家或地区有很好的应用, 如美国FEMA、香港土

收稿日期(Received date): 2010—05—14 改回日期(Accepted): 2010—05—19

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展(973)计划(2008CB425802)、中科院百人计划项目及云南财经大学社会与行为中心项目资助。[This research is supported by state 973 Program Project 2008CB425802 and the CAS Hundred Talent Program and Social & Economics Behavior Center of Yunnan University of Finance and Economics.]

作者简介(Biography): 刘洪江(1971—): 博士, 副教授, 研究方向: 3S技术与减灾。[Liu Hongjiang (1971—): Ph.D. Associate Professor Specialized in 3S technology and hazards mitigation.] E-mail: hllh@mdc.ac.cn

*通讯作者(Corresponding author, lanhx@gsnir.ac.cn)

木工程署、加拿大地质地表灾害分析中心等,并在减灾工作中发挥了重要的作用。国内外许多学者都开展了泥石流的数值模拟研究,其中的许多方法被采用^[4-10]。由于泥石流运动过程求解较为复杂,且工具软件较少,求解效率甚低,因而少见群发式泥石流的模拟及应用研究。在新的求解工具软件不断出现的情况下,其演算效率大大提高,使得群发式泥石流灾害的分析模拟成为几小时内就可以完成的工作,因而可以用于地震次生山地灾害的快速响应及应急工作中。本研究的工作是玉树次生地质灾害快速评估的部分内容。

1 研究方法

采用对泥石流运动方程求解,结合区内流域DEM得到汇流、坡度等信息,采用高精度遥感影像解译分析泥石流沟的固体物源区,并分别建立各泥石流流域的水文流量过程,同时对威胁结古镇重建区的17条泥石流沟进行数值模拟,实现结古镇群发式泥石流灾害精细定量评估。

研究区概况

按国务院玉树地震灾后重建初步规划方案,考虑到结古镇的宗教、文化、政治、经济上的意义,灾后重建基本定为原地重建。重建规划区范围主要沿扎曲河谷两侧展布至山麓,西至扎西科河滩,东至歇武镇西侧,总面积约 15.1 km²。

由于结古镇坐落于扎曲河谷,南北均为高山,地形陡峻,为泥石流的活动提供了充足的动力条件。在重建区内,震前泥石流灾害就极为活跃,结古镇是建立在现代泥石流堆积扇上的城镇,现代泥石流活动强烈,直接危及城区。自 1987 年以来,结古镇几乎每年都发生泥石流灾害,受泥石流灾害威胁的人口达 2 万余人。最近的一次泥石流暴发时间为 2003—07—29 结古镇北山 5 条沟同时暴发泥石流,泥石堆积量估算达 $2.4 \times 10^5 \text{ m}^3$,造成 1 人死亡,11 人受伤,致使沟下游的党政机关、企事业单位、学校、商贸企业与居民楼等遭受严重损失,直接经济损失达 2 500 万元^[11]。根据野外实地调查,在该区内共发育了 17 条泥石流沟(图 1 表 1)因此模拟区选择在结古镇重建规划区以及 17 条泥石流流域覆盖范围。



图 1 重建规划区范围图及模拟泥石流沟谷

Figure 1 Bound of reconstruction area and debris flow gullies for numeric simulation

表 1 结古镇重建规划区内泥石流沟流域特征

Table 1 The main geomorphic feature of debris flow gullies within the reconstruction planning area in Jiegou town

编号	沟名	沟口 经度	沟口 纬度	流域面积 (km ²)	沟床比降 (‰)	高差 (m)	泥石流 暴发时间	危害 类型	最大冲出方量 (× 10 ⁴ m ³)	所在 村镇
1	德念陇巴	96°57′ 54″	33°00′ 35″	3. 5	100	1 097	2003年	城镇	2. 43	德宁格村
2	杂生陇巴	96°58′ 25″	33°00′ 28″	0. 5	150	880	2003年	城镇	0. 32	德宁格村
3	日窝陇巴	96°59′ 40″	33°00′ 38″	2. 3	220	880	2001年	城镇	1. 55	德宁格村
4	日窝陇巴西	96°59′ 23″	33°00′ 37″	0. 3	200	450	2003年	城镇	0. 30	德宁格村
5	结古陇巴沟	97°00′ 54″	33°00′ 39″	9. 5	180	1 034	2003年	城镇	6. 28	团结村
6	杂陇沟	97°01′ 26″	33°01′ 01″	1. 5	300	824	2003年	城镇	1. 01	团结村
7	肖鲁隆沟	97°03′ 22″	33°01′ 22″	0. 9	190	844	2002年	城镇	0. 58	新寨村
8	热翁陇	97°04′ 02″	33°01′ 07″	41	100	1 401	2003年	城镇	18. 21	新寨村
9	治绒南沟	97°04′ 33″	33°00′ 53″	3. 1	130	770	2000年	城镇	1. 95	新寨村
10	上尖果陇	97°06′ 39″	33°00′ 48″	4. 2	150	1 134	2002年	城镇	1. 16	东风村
11	下尖果陇	97°06′ 44″	33°00′ 42″	3. 5	200	973	1998年	城镇	2. 28	东风村
12	显子陇	97°06′ 41″	33°00′ 25″	5. 0	260	1 300	/	城镇	3. 53	东风村
13	代咯陇	97°07′ 23″	33°00′ 24″	4. 1	200	1 089	1998年	城镇	2. 68	东风村
14	达地沟	97°01′ 30″	32°59′ 59″	1. 9	290	761	2002年	城镇	1. 26	当代村
15	德窝陇巴	97°00′ 56″	32°59′ 54″	1. 7	270	521	/	城镇	1. 15	当代村
16	尼陇库	97°02′ 17″	32°57′ 04″	10. 2	260	1 170	1989年	城镇	6. 57	胜利村
17	孟宗沟	96°59′ 46″	32°59′ 16″	12. 1	140	1 025	1987年	城镇	8. 38	西杭村

“4. 14”地震的破裂带沿 NNW—SSE方向延伸,并穿过结古镇市区^[12],遥感影像、航片均显示出南北两侧山体形成大量土体滑坡及部分碎屑流,雨季来临后,在很小的降雨强度下,就容易形成粘性泥石流,对灾后重建威胁很大。因此有必要开展结古镇泥石流灾害精细分析评价研究,在此背景下,本文利用泥石流数值模拟方法进行结古镇重建区群发式泥石流灾害模拟,为灾后恢复重建中面临的次生山地灾害防治提供科学依据。

“4. 14”地震后,结古镇北山山体受到地震影响,滑坡大量存在,在很小的暴雨强度下即可能引发大规模泥石流灾害。尽管在2003年泥石流灾害发生后,危害结古镇主要的泥石流沟都修建了3~5级泥石流拦挡坝,但现有拦挡坝内淤积物质较多^[13-14],同时受到地震的影响,拦挡坝有可能出现工程结构问题。与此同时,经遥感解译,震后在结古镇西北震中方向的河谷出现大量滑坡,结古镇上游河道山坡也有大量滑坡存在,在雨季极易形成区域性群发性泥石流灾害,堵断巴塘河,引起二次溃决洪水。因此结古镇泥石流灾害必须引起灾后重建的高度重视。

数据

研究采用的数据主要包括基础地理数据,遥感数据,降雨观测数据,野外灾害调查数据等,数据源、内容及提供单位见表2。

数值模拟过程

1. 3. 1 泥石流运动方程

为模拟结古镇泥石流成灾范围及预估其灾损,我们利用二维泥石流运动方程反演泥石流堆积泛滥过程,在此基础上开展结古镇泥石流灾害评价。泥石流运动模型采用下列公式进行描述,配合GIS数字地形模型(DEM)模拟泥石流灾害过程

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial (MU)}{\partial x} + \beta \frac{\partial (MV)}{\partial y} = -g_h \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{F_x}{\sigma_f} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial (NU)}{\partial x} + \beta \frac{\partial (NV)}{\partial y} = -g_h \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{F_y}{\sigma_f} \end{cases}$$
$$F_x = (\alpha - \rho) g_h C_d \cos \theta_x \tan \alpha + k \frac{D}{d} \sqrt{U^2 + V^2} U$$
$$F_y = (\alpha - \rho) g_h C_d \cos \theta_y \tan \alpha + k \frac{D}{d} \sqrt{U^2 + V^2} V \quad (1)$$

式中 h —泥深(m); M — x 方向流量; N — y 方向流

表 2 主要数据来源
Table 2 The main data types and its sources

编号	数据源	提供单位	数据内容
1	重建规划范围	国家测绘局	结古镇重建规划界限
2	基础地理数据库	中国科学院地理科学与资源研究所	地质、断层、1:10万 DEM 居民点、水系、土壤、植被
3	遥感	中国科学院对地观测中心	结古镇灾前、灾后 ETM 灾前 SPOT 灾前 P6(5.8 m)
4	航拍数据	国家测绘局	结古镇 0.41 m 航拍光学数据及航拍雷达数据
5	SRIM	美国 NASA	SRIM 地形 DEM
6	泥石流沟调查数据	国土资源部	结古镇泥石流排查数据
7	降雨	国家气象局	结古镇建站至 2008 年降雨资料

量; β —运动修正系数; U_x — x 方向流速 (m/s); V_y — y 方向流速 (m/s); g —重力加速度; H —泥石流表面标高 (m); F_x 、 F_y —摩擦阻力; δ —泥石流容重 (γm^3); α 和 ρ 分别为泥石流、水的比重; C_d —流体中泥石体积比; θ_x 、 θ_y —沿 x 、 y 方向的堆积区坡度; $\tan\phi$ —动力摩擦系数; k —泥石流阻力系数; D —堆积层厚度 (m); d —颗粒粒径。

模拟区域选择在结古镇周围的 17 条泥石流沟。其中结古镇北侧山区 11 条泥石流沟, 2003 年 5 条同时暴发泥石流; 南部山区选择 6 条进行模拟。采用本次航测 10 m 等高线的 DEM 与 SRIM 套合生成的作为地形 DEM 输入数据, 泥石流过程情景采用 2003—07—29 的泥石流沟流量进行估算。

1.3.2 GIS 数据库的建立及网格划分

通过 SRIM 及 1:10 万地形图, 建立模拟区域内的基础 GIS DEM 数据库。同时根据震后快鸟影像及航拍高精度影像确定每条泥石流沟的滑坡及松散碎屑物质估算方量, 从而建立泥石流基础 GIS 数据库。然后划分数值模拟网格大小, 本研究采用了 SRIM 90 m 网格大小。

1.3.3 方程求解

采用剖开算子解法对方程进行求解。剖开算子解法是一种高效率的偏微分方程的求解方法, 利用剖开算子可以对偏微分方程快速降解, 最后采用乔里斯基线性方程组解算每个网格的泥石流物质运动动力分量, 然后结合所在单元网格的地形因素计算网格及其临近网格的各分量值。

1.3.4 群发式泥石流模拟

群发式泥石流模拟与单沟泥石流模拟的差异在于, 在同一时间存在多个流域的泥石流暴发源, 且如果两条或等多条泥石流沟交汇时, 需要考虑交汇后的动力作用过程。因而, 群发式泥石流模拟更符合

结古镇客观实际情形。

1.3.5 泥石流流变方程

泥石流流变方程采用 O'Brien 公式, 总应力共包含粘聚力、莫尔库伦剪应力、粘聚剪切力、紊流剪应力和离散剪切力等五项应力 (Brien, 1993), 用公式 (2) 表示

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \tag{2}$$

泥石流流量过程确定

根据 2003—07—29 泥石流的暴发记录, 结古镇北山 5 条泥石流沟的总物质堆积量为 $2.4 \times 10^5 m^3$ 左右, 暴发时间从 19:00~21:00 共计 2 h 左右。由于当时为粘性泥石流, 按照平均 60% 的含沙量进行估算, 最大流量在 $22.2 m^3/s$ 左右。采用的流量过程线、含沙量及过程曲线图见表 3。具体每一条泥石流沟的流量过程线采用表 1 中最大冲出方量来进行估算 (表 3)。

2 模拟结果与危险性分析

结果精度检验

对结果进行检验的最好方法是与实际地物的对比分析, 如果其范围、形状、大小等信息符合实际地物的分布, 则说明模拟的结果基本是准确的。为此我们用两条沟的泥石流做模型结果检验, 一条是扎陇沟, 另一条是结古陇巴沟。这两条沟均于 2003—07—29 暴发泥石流, 其中结古陇巴暴发后危及到了沟下游的党政机关单位, 图 2—A 中的 C 处即为玉树州政府所在地。而模拟结果表明泥石流在到达这一带后仍具有较大的动能与势能, 具有一定的破坏性 (图 2—A 图 2—B)。

扎陇沟泥石流模拟结果 (图 2—B) 形成的堆积扇大小与实际的堆积扇大小具有很好的一致性,

模拟在 A C及 B处会形成外缘堆积扇,而实际影像表明 A C处,历史上泥石流曾经形成过堆积扇,在后期河流的侵蚀作用下其形态有了一定的改变。尤其是 A C处河流基本沿泥石流堆积扇呈弧形通过,说明模拟满足实际应用的精度。

结古陇巴沟模拟的堆积扇大小、形状与实际冲积扇均吻合,在图中的 A处,堆积扇与实际河流沿泥石流冲积扇的走向具有一致性。在图中的 B C处街道、道路的形状、排列基本与模拟泥石流等深线保持一致。一般说来城区道路、街道基本是沿等高线进行布局的,因此可以推断结古陇巴沟口附近的

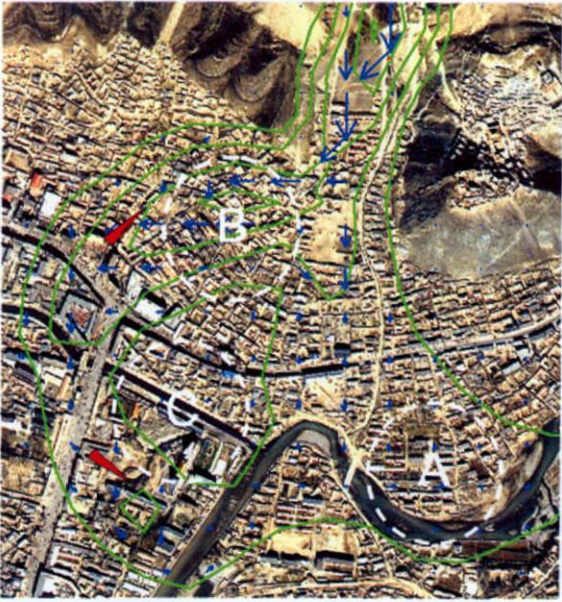
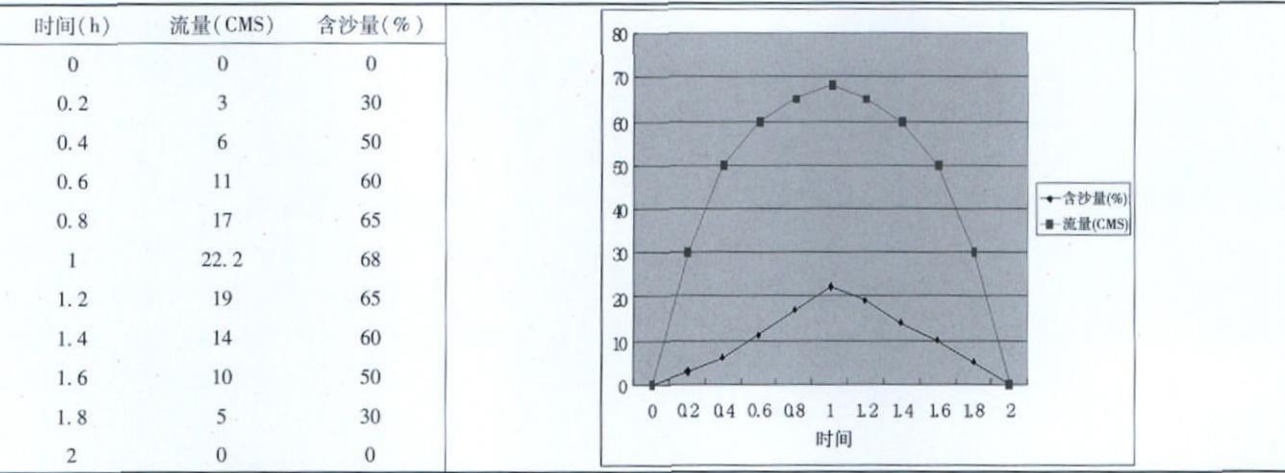
街区建筑是建于古泥石流堆积扇上;这同时也说明模型模拟结果具有很高的精度。

结古镇群发性泥石流灾害危险性分析

对结古镇群发性泥石流模拟结果表明,目前对结古镇建成区危害比较大的依次是结古陇巴、达地沟、扎陇沟和德念陇巴沟泥石流,这些沟均位于结古镇建成区内,其泥石流破坏性较大。其他的沟则远离目前的建成区,但是按结古镇重建规划扩大城区后,其危险性就显露出来,在整个规划区范围内,危害性比较大的依次是热翁陇、上尖果陇、下尖果陇、显子陇、结古陇巴、达地沟、德念陇巴的泥石流。

表 3 结古陇巴沟泥石流流量过程曲线

Table 3 Flow curve for the debris flow gully of Degulongba



A 结古陇巴沟



B 扎陇沟

图 2 扎陇沟与结古陇巴沟模拟结果及实际堆积扇分布

Fig. 2 Contrast between Numeric simulation and actual distribution of Zalong and Jiegu Longba gully

群发性泥石流的另外一个特点是泥石流堵河的可能性较大。从结古镇泥石流沟的展布来看, 大多数泥石流沟为对冲性, 说明这一地区地貌演化的剧烈性与处于壮年期的特性。对冲型沟谷如果一起暴发泥石流则非常容易堵断扎曲河, 从而造成进一步的次生灾害。区内存在 4 处明显的可能堵断河道的地点(图 3)。图 3 中 A 处河两岸分别为左娘陇巴和巴俄钦陇巴, 二者在河口几乎交于一点, 如同时暴发泥石流则很容易堵断扎曲河危及下游城镇安全。B 处为左岸为结古陇巴, 右岸为达地沟, 结古陇巴于 2003 年暴发了泥石流, 达地沟则于 2002 年暴发了泥石流, 如果同时暴发泥石流也容易引起扎曲河道的堵塞。C 处为区内最大面积的泥石流沟热翁陇, 由于其物质储量丰富, 如果暴发泥石流则足以堵断主河道。D 处为上尖果陇、下尖果陇和显子陇 3 条泥石流沟的交汇处, 3 条泥石流沟高差大, 流域面积中等, 物质储量丰富, 均容易暴发大型泥石流灾害, 堵河的危险性也很大。

从规划区内群发性泥石流分析结果来看, 结古镇受泥石流威胁较为严重, 目前重建经费预算初步估计为 300~700 亿元, 且灾区重建的首要基本方针是必须确保其安全性, 由于结古镇泥石流的严重性, 因此必须对结古镇规划区内的泥石流沟实施工程治

理措施。

泥石流流速、泥深及最大泥深抵达时间分析

我们选取了危害市中心的结古陇巴沟进行泥石流流速、泥深及到达时间的具体分析。结古陇巴位于结古镇团结村, 流域面积 9.5 km^2 , 流域相对高度 1034 m 于 2003-07-29 暴发过泥石流灾害。

2.3.1 泥深

结古陇巴沟主沟长度 5.1 km , 泥深的剧增位置在源头至沟道下游的 800 m 处, 这一段是泥石流的形成区; 从形成区再往下至 2.2 km 处泥深基本保持不变, 说明这一段是泥石流的流通区; 在紧邻结古镇上游约 $200 \sim 300 \text{ m}$ 处, 泥石流开始出现剧烈堆积, 从基础地图可以量出这一点为泥石流堆积扇的入口点, 表明此为堆积区段。图 4-B 中的三处明显的峰值顶点表明泥石流的不同流通段。至结古镇下的扎曲河谷, 泥深达到堆积扇区最大值。图 4-A 表明泥深的分布及泥石流危害区域为扎曲河谷以北至结古陇巴沟口部分, 这一段应为灾后重建的避让区。

2.3.2 流速

结古陇巴沟泥石流最大流速分布基本沿沟运动的中线保持最大, 在到达沟口处, 受地形影响泥石流流动呈 90° 转角偏向西南方向继续保持高速运动, 再往前运动 500 m 左右后, 流速逐渐慢下来, 能量迅

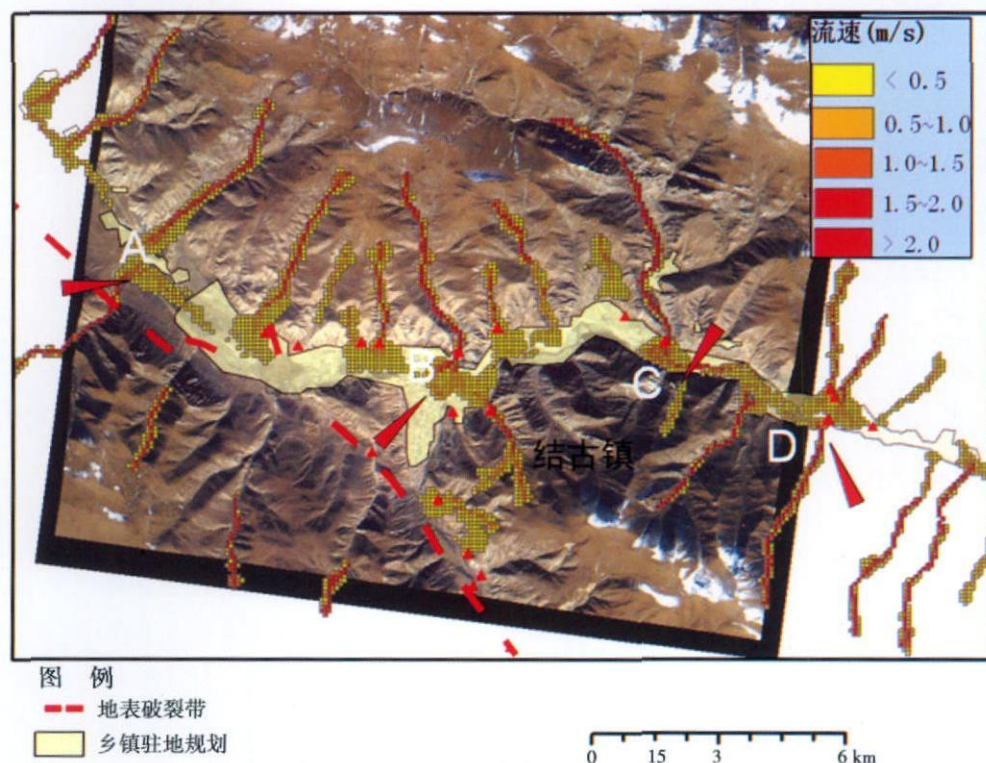


图 3 结古镇群发性泥石流灾害模拟

Fig 3. Numeric simulation for group occurring debris flow in the Jiexu Town

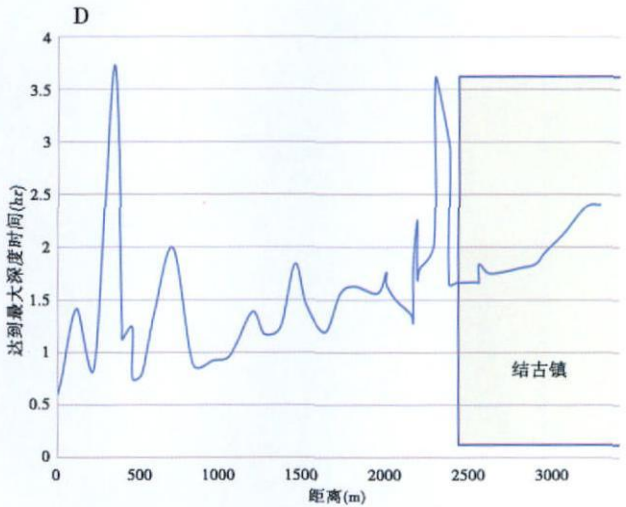
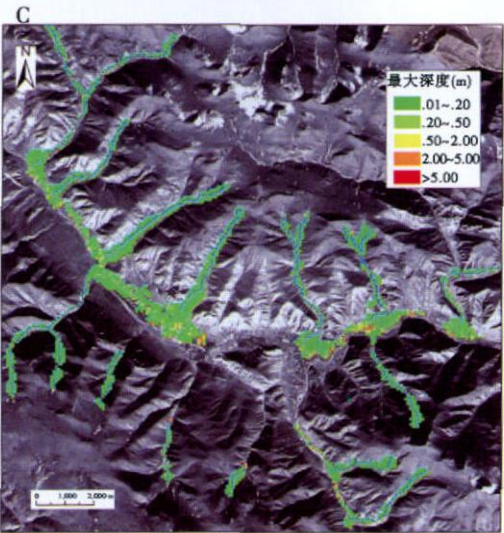
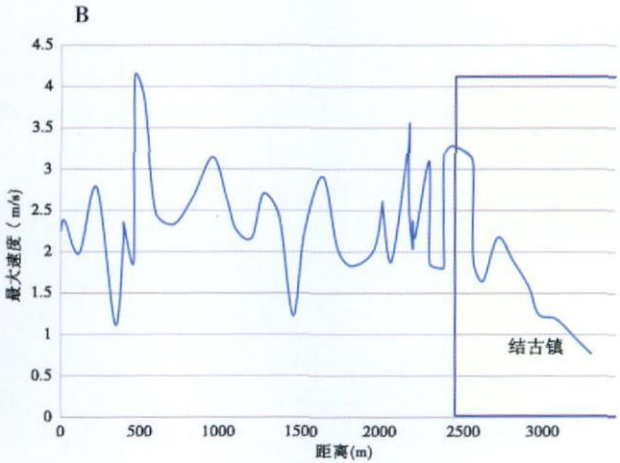
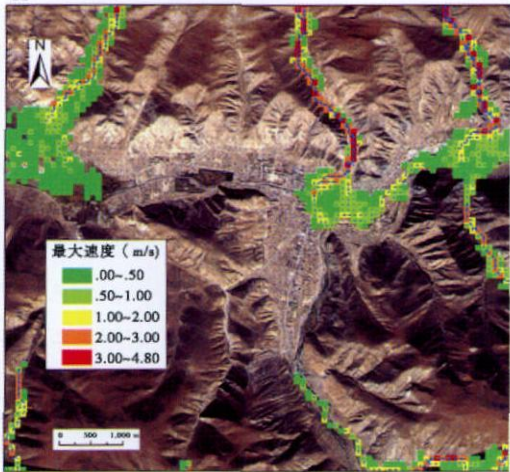
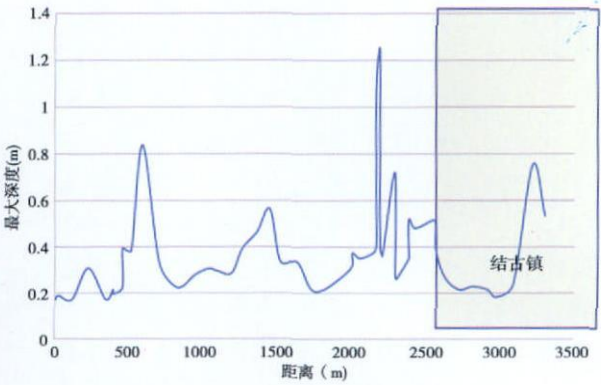
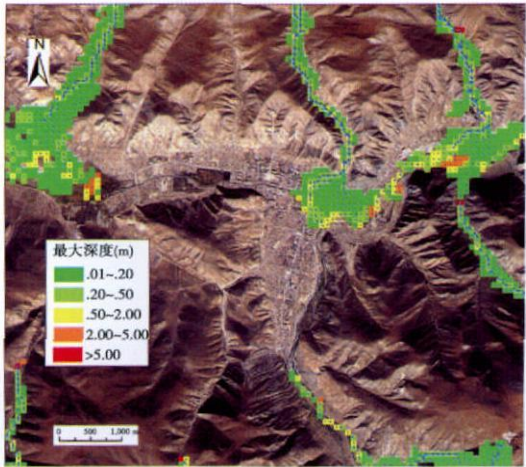


图 4 结古陇巴沟泥深、流速及时间分析

Fig. 4 Flow depth, velocity and arriving time analysis for Jiegu Longba gully

速衰减,最后停滞淤积(图 4—C)。从其空间距离分析,由源区一直到下游 2 500 m 距离的沟道处均保持很大流速,说明这一段主沟沟床比降大,从

1 500 m 一直到结古镇均保持较大流速,仅在到达结古镇后才迅速降低(图 4—D),这充分说明结古陇巴沟是一条泥石流破坏性极强的沟。

2.3.3 达到最大泥深时间

从泥石流的抵达时间看, 结古陇巴沟在发生泥石流后, 平均在 2.5 h 内泥深达到最大值, 其中沟口位置处最大泥深的约在 3.7 h 后出现。这意味着一旦泥石流暴发, 其持续时间较长, 结古镇在 3 h 左右达到最大泥深。

3 结论与讨论

1. 本研究采用对泥石流过程模型进行数值模拟, 结合 GIS 技术, 并采用遥感进行泥石流补给源区的识别, 实现了地震次生山地灾害的精细量化危险性评估, 并用于玉树“4. 14”地震震后结古镇泥石流灾害的防治及灾后重建规划方案确定上。

2. 在进行灾后重建时, 需要对结古镇泥石流进行工程治理, 方能确保重建的安全性。

3. 结古镇区域内泥石流具有堵断主河的危险性, 进而造成进一步的次生溃坝灾害, 危及结古镇安全。

4. 对结古陇巴沟进行了精细的危险性评估, 从泥石流流速、泥深、到达时间来看, 结古陇巴沟是一条极具危险性的泥石流沟, 需要进一步加强治理。

本文根据泥石流运动方程, 结合高精度遥感、GIS 技术实现了泥石流灾害的精细定量危险评估, 具有一定的实用性, 可以用于实际工作, 尤其是灾害应急服务上。但模型的 DEM 采用的是 SRTM 90 m 分辨率的数据, 如果能采用高精度的 LiDAR 测绘 DEM 数据, 则模拟精度会进一步提高。

致谢: 本文在研究过程中采用了中国科学院对地观测中心提供的玉树灾区遥感影像, 国家测绘局提供的高精度快鸟及航拍数据, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所震前全国泥石流灾害编目数据库以及 NASA 提供的 SRTM 数据, 在此一并表示深深谢意!

参考文献 (References)

- [1] Cui Peng, Wei Fangqiang, He Siming, et al. Mountain disasters induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan and the disasters mitigation [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(3): 280~282 [崔鹏, 韦方强, 何思明, 等. 5.12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施 [J]. 山地学报, 2008, 26(3): 280~282]
- [2] Xie Hong, Zhong Dunlun, Jiao Zhen, et al. Debris flow in Wenchuan quake hit area in 2008 [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(4): 501~509 [谢洪, 钟敦伦, 矫震, 等. 2008 年汶川地震重灾区的泥石流 [J]. 山地学报, 2009, 27(4): 501~509]

- [3] Tang Chuang, Tie Yongbo. Reconnaissance and analysis on the rain storm induced debris flow in Weijiaogou Valley of Beichuan city after the Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(5): 625~630 [唐川, 铁永波. 汶川震区北川县城魏家沟暴雨泥石流灾害调查分析 [J]. 山地学报, 2009, 27(5): 625~630]
- [4] O'Loughlin E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis [J]. Water Resources Research, 1986, 22(5): 794~804
- [5] O'Brien J. S., P. Y. Julien and W. T. Fullerton. Two-dimensional water flood and mudflow simulation [J]. J. of Hydr. Eng., ASCE, 1993, 119(2): 244~259
- [6] Lan HX. Numerical modeling of debris flow kinematics using discrete element method combined with GIS [J]. 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes, 2008(2): 769~775
- [7] Wei Fangqiang, Hu Kaiheng, J. L. Lopez, et al. Debris Flow Hazard Zoning Method and application of momentum [J]. Chinese Science Bulletin, 2003(3): 298~301 [韦方强, 胡凯衡, J. L. Lopez, 等. 泥石流危险性动量分区方法与应用 [J]. 科学通报, 2003(3): 298~301]
- [8] Lan Hengxing, Zhou Chenhui, Wang Xiaobo. A literature review on debris flow constitutive model and its dynamic simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, (15): 314~321 [兰恒星, 周成虎, 王小波. 泥石流本构模型及动力学模拟研究现状综述 [J]. 工程地质学报, 2007, (15): 314~321]
- [9] Tang Chuang. Discussion for Numerical simulation for two dimension debris flow [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1994, 21(5): 9~12 [唐川. 平面二维泥石流数值模拟方法的探讨 [J]. 水文地质工程地质, 1994, 21(5): 9~12]
- [10] Liu Hongjiang, Tang Chuang. The object oriented software package of debris flow numerical simulation and its application in dangerous zoning [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2000, (2): 15~20 [刘洪江, 唐川. 泥石流数值模拟软件包类体系的建立及应用 [J]. 云南地理环境研究, 2000, (2): 15~20]
- [11] Xiao Hongbin, Cai Jenzaxi, Gelebadu, et al. Analysis for reason of debris flow of north hillside of Yushu Jiegu Town in 2003. 7. 29 [J]. Qinghai Science and Technology, 2005(1), 37~39 [肖宏斌, 才仁扎西, 格勒巴德, 等. “2003. 7. 29”玉树县结古镇北山泥石流成因分析 [J]. 青海科技, 2005(1): 37~39]
- [12] Zhang Yongshuang, Ma Yansheng, Hu Daogong, et al. Yushu Earthquake Surface Rupture Site Investigation and the Problems of Reconstruction Avoidance [R]. 2010. 4 [张永双, 马寅生, 胡道功, 等. 玉树地震地表破裂调查与灾后重建避让选址研究 [R]. 2010. 4]
- [13] Department of Qinghai Land Resources. Yushu Earthquake Reconstruction Settlements Suitability Assessment Report [R]. 2010. 4 [青海省国土资源厅. 玉树地震灾区恢复重建安置点场地适宜性评估报告 [R]. 2010. 4]
- [14] Yin Yueping, Tian Tingshang, Li WenYuan, et al. Yushu Earthquake Geology Investigation [R]. 2010. 4 [殷跃平, 田廷山, 李文渊, 等. 青海玉树地震地质灾害调查 [R]. 2010. 4]

Numeric Simulation for Group-occurring Debris Flows and Its Risk Analysis in Jiegu Township after the Earthquake of Yushu Qinghai Province

LIU Hongjiang², LAN Hengxing, CHEN Weinong

(1 State Key Lab of Resource and Environment Information System CAS Beijing 100101 China

2 School of Urban Management and Resource & Environment Yunnan University of Finance and Economics Kunming 650223 China)

Abstract: The first 5 to 10 years or so after a strong earthquake have a high dangerous degree for occurring debris flow in the epicenter area. There have 5 debris flow gullies which happened group-occurring debris flow disaster in the north hillside of Jiegu township in the July 29 to 2003. The earthquake of Ms. 1 occurred in 14 th of April 2010 near Yushu produces a lot of landslide and rockfall near Jiegu town which provides a rich loose material for the possibility of debris flow hazard in future. According to the scope of planning and reconstruction designated by the State Council and field survey data, 17 debris flow gullies threaten to Jiegu town are identified. Numeric simulation model for Kinematics siltation is used to simulate the group-occurring 17 gullies in GIS environment combining with its developing conditions such as terrain slope, channel discharge, sediment content. The motion equation for debris flow is solved. Results of simulation show well consistent with the actual movement and deposition distribution of debris flow gullies which indicate the accuracy of the model and numeric simulation. The analysis results also show that the debris flow post a great threaten to the post disaster reconstruction of Jiegu town, for debris flow reaches even at the end of town, its maximum velocity, flow depth and energy still has great destructive. Two serious debris flow gullies threaten to the build-up area of Jiegu town are identified as Jiegu pengba gully and Den'anlongba gully. At the same time, more debris flow gullies which serious threatening to the new reconstruction planning area are located in the study area which are Reweng gully, Shangjianguo gully, Xajianguo gully and Xianzi gully. Part segments of the main river of Zaqu have the risk of blocked by debris flow. It is proposed that engineering control measurement for those gullies should be carried out as to guarantee the safety of post earthquake reconstructing for the expectation of "New Yushu, New Jiegu".

Key words: Yushu earthquake, debris flow, numeric simulation, Jiegu Township, group-occurring mountain disaster