

# 暴雨泥石流冲出距离预测

铁永波<sup>1,2</sup>, 唐川<sup>2</sup>, 倪化勇<sup>1</sup>

(1. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081; 2. 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)

**摘 要:** 有效确定泥石流可能的危险范围对制定防灾减灾规划具有重要的参考价值。在对 2008 - 09 - 24 北川县境内发生的 72 处暴雨泥石流调查的基础上, 通过对泥石流冲出距离的统计分析, 提出了基于地貌学特征的泥石流冲出距离预测模型。模型根据泥石流流域面积的大小分类, 给出了相应的计算取值参数范围。将该模型应用到汶川县城后山 2 条泥石流沟进行验证, 计算结果表明, 用模型预测的泥石流冲出距离比实际冲出距离稍偏大, 平均误差值介于 4% ~ 11% 间, 这对泥石流实际冲出距离的预测是可行的。

**关键词:** 暴雨泥石流; 冲出距离; 预测模型; 汶川震区

**中图分类号:** P642. 23

**文献标识码:** A

“5. 12”汶川地震诱发大量的滑坡、崩塌及不稳定斜坡等不良地质体, 造成大量的松散固体物质堆积在坡面或沟道内, 为泥石流的孕育和发生提供了有利的物源条件<sup>[1-2]</sup>。通过对 2008 - 09 - 24 北川县境内的暴雨泥石流灾害调查发现, 泥石流发生后, 并不像其他地区的泥石流那样通常直接进入上一级的主河道, 而是在一定的距离范围内便停滞下来, 形成淤埋, 其冲出距离是有限的。这些现象在北川擂鼓镇的赵家沟泥石流和老北川中学后山魏家沟泥石流中表现得尤为明显, 如擂鼓镇赵家沟泥石流在冲出沟口后, 泥石流在距离沟口约 750 m 处的一个公路涵洞处形成明显的扇状堆积, 其下游沟道只有少量的细颗粒和水冲出; 老北川中学后山的魏家沟泥石流在冲出沟口后, 由于流域高差相对较小, 且地表粗糙程度较大, 该泥石流冲到距沟口约 500 m 处的北川中学操场附近便停滞下来, 淤埋了操场和食堂部分建筑, 其冲出距离也是有限的。鉴于在强震这一极端事件作用下, 震区暴雨泥石流的冲出特征难以用其他地区泥石流的冲出模式对其进行解释, 因此, 需要探索一种能对震区泥石流冲出距离进行合

理预测的方法, 对汶川地震区泥石流进行预测和制定防灾减灾规划, 为灾后重建提供决策参考。

## 1 数据来源及评价方法

论文中所使用的数据主要来自 2008 - 08 - 24 北川县境内发生的 72 条泥石流, 为了能更好地区分不同流域面积下泥石流的发育特征及冲出距离, 根据流域面积将 72 条泥石流沟分为面积介于 0 ~ 2 km<sup>2</sup>、2 ~ 5 km<sup>2</sup> 及 > 5 km<sup>2</sup> 三类。其中面积介于 0 ~ 2 km<sup>2</sup> 的有 23 条、介于 2 ~ 5 km<sup>2</sup> 的有 19 条、> 5 km<sup>2</sup> 的有 30 条, 分别占总数的 32%、26% 和 42%。在实际调查中研究发现, 并不是所有的泥石流沟都能确定出准确的冲出距离, 如泥石流进入主河道后, 就很难确定其冲出距离的具体位置, 为此, 需要对一些无法确定泥石流具体冲出距离的沟进行筛选, 即排除泥石流堆积角和冲出角角度之差 < 1° 的泥石流沟进行统计分析。根据以上分析, 最后得到的有效泥石流沟数量为 51 条, 其中流域面积介于 0 ~ 2 km<sup>2</sup> 的 23 条泥石流沟中, 有 5 条泥石流沟的堆积扇堆积

收稿日期 (Received date): 2010 - 03 - 15; 改回日期 (Accepted): 2010 - 10 - 20。

基金项目 (Foundation item): 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 (成都理工大学) 开放基金 (GZ2009 - 09) 和研究基金。[Special Research fund and Research Fund of State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology).]

作者简介 (Biography): 铁永波 (1979 -), 男, 博士, 主要从事环境地质和灾害地貌方向研究。[Tie Yongbo (1979 -), male, P H D, majoring in environmental geology and disastrous landform research. ] E - mail: tyongbo@cgs. cn

角和冲出角角度之差 $<1^{\circ}$ ,有效泥石流沟条数为18条;流域面积介于 $2\sim5\text{ km}^2$ 的19条泥石流沟中,有7条泥石流沟的堆积扇堆积角和冲出角角度之差 $<1^{\circ}$ ,有效泥石流沟条数为12条;流域面积 $>5\text{ km}^2$ 以上的30条泥石流沟中,有9条泥石流沟的堆积角和冲出角的角度之差 $<1^{\circ}$ ,有效泥石流沟条数为21条(表1)。

虽然已有许多学者开展了确定泥石流危险范围的相关研究,但仍因泥石流内在动力学机制的不明确,或存在边界条件的不确定性,或一些参数难以获取,而使得评价结果的误差较大,因此,目前对泥石流危险范围的确定方法尚处于探索阶段<sup>[3-6]</sup>。许多学者认为,在流域面积和流域相对高差一定的情况下,无论是何种规模条件下的泥石流,都对应着一个最远的冲出距离,一旦确定了最远的冲出距离,泥石流的最大潜在危险范围也就能基本确定<sup>[7-8]</sup>。且认为,泥石流堆积区的堆积坡度也应在 $10^{\circ}$ 以下,即沟道坡度小于 $10^{\circ}$ 是泥石流发生堆积的临界条件<sup>[9-14]</sup>。基于以上思路,强震区泥石流最远冲出距离的评价方法也是基于能量守恒原理,以流域地貌特征(流域相对高差)为主要因子而开展。其具体方法如下:1. 通过流域等高线在GIS下生成DEM图形并做坡度分析,确定出沟道坡度开始小于 $10^{\circ}$ 的地区,并以此点作为泥石流堆积区的起点,在AUTOCAD下将该点与流域最高点连线,得到泥石流的冲出角( $\alpha$ )值;2. 将已有的泥石流最远冲出距离点确定,并将该点与流域最高点相连,得到泥石流的堆积角( $\beta$ )值的大小;3. 将51条泥石流沟的冲出角( $\alpha$ )值和堆积角( $\beta$ )值的统计数据进行汇总;4. 对泥石流的冲出角( $\alpha$ )和堆积角( $\beta$ )进行二次拟合分析,最终得到堆积角( $\beta$ )和冲出角( $\alpha$ )的相互关系模型。强震区泥石流冲出距离评价概念模型见图1。

2 泥石流冲出距离预测模型

由于流域面积的大小决定着流域的地表径流量,径流量的大小在一定程度上会影响到泥石流的重度大小(粘性泥石流或稀性泥石流),从而改变泥石流的运动特征,使得不同重度条件下的泥石流最远冲出距离存在差异。因此,不同流域面积条件下泥石流的冲出距离也具有较大的差异,故无法用一个预测模型实现不同流域面积下泥石流最远冲出距离的评价,而是在对泥石流流域面积分类的基础上,

表1 典型暴雨泥石流沟数量与流域面积对应特征表

Table 1 The relationship between rainstorm induced debris flow numbers

and basin area		
流域面积/ $\text{km}^2$	有效泥石流沟数量/条	占总数比例/%
0~2	18	35
2~5	12	24
$>5.5$	21	41

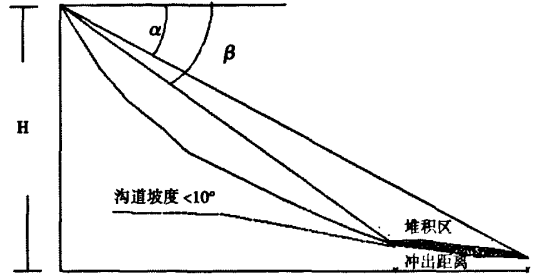


图1 泥石流冲出角( $\alpha$ )与堆积角( $\beta$ )的概念模型图

Fig.1 The concept model of debris flow run-out angle ( $\alpha$ ) and deposit angle( $\beta$ )

才能建立适合特定流域面积范围内泥石流最远冲出距离的预测模型。根据以上分析及汶川地震区北川县境内泥石流流域面积分布特征,将51条泥石流沟按照面积的大小分为三类: $<2\text{ km}^2$ 、 $2\sim5\text{ km}^2$ 和 $>5\text{ km}^2$ 。在面积分类的基础上,通过对以上51条泥石流沟的统计数据进行拟合,得到强震区泥石流最远冲出距离预测模型如下

$$\begin{aligned} &\text{当 } 0 < A < 2 \text{ 时; } \omega = 2 \\ &\alpha = 0.826\beta + \omega \quad \text{当 } 2 < A < 5 \text{ 时; } \omega = -0.3 \quad \text{式(1)} \\ &\text{当 } A > 5 \text{ 时; } \omega = -0.55 \end{aligned}$$

式中  $\alpha$  为泥石流堆积终点和流域最高点连线与水平方向的夹角( $<90^{\circ}$ ); $\beta$  为泥石流开始堆积点(沟道坡度 $<10^{\circ}$ 处)和流域最高点连线与水平方向的夹角( $<90^{\circ}$ ); $A$  表示流域面积( $\text{km}^2$ ); $\omega$  为流域面积系数,根据  $A$  值的大小确定。

为验证预测模型的准确性,在泥石流冲出距离和堆积角已知的基础上,将该模型带入51条泥石流沟中进行验证,以确定计算值与实际值之间的差异。通过将计算得到的泥石流冲出角和泥石流实际冲出角进行对比分析发现,计算得到的泥石流冲出角普遍偏大,其中流域面积介于 $0\sim2\text{ km}^2$ 的泥石流沟的误差为 $+6.7\%$ ;介于 $2\sim5\text{ km}^2$ 的泥石流沟的误差为 $+4.0\%$ ;  $>5\text{ km}^2$  泥石流沟的误差为 $+11\%$ 。可以看出,流域面积介于 $2\sim5\text{ km}^2$ 的泥石流沟的误差

表 2 泥石流冲出距离预测值与实际值比较

Table 2 The contrast between predication distance and real distance

泥石流流域面积分类 /km <sup>2</sup>	$\alpha$ 实测平均值 /°	$\alpha$ 计算平均值 /°	平均误差 /%
< 2	23.7	23.6	6.7
0 ~ 2	17.7	17	4.0
> 5	11.9	12.2	11

最小(表 2)。

通过统计分析可以看出,不管是实际的还是计算得到的泥石流冲出角,都随着流域面积的增大而减小。在其他影响因素相同的条件下,泥石流的冲出角越大,泥石流的冲出距离也越大,反之,则越小,即泥石流冲出角的大小可反映泥石流冲出距离的大小。

3 预测模型的应用

为了验证该方法的可行性,论文以“5. 12”汶川地震区之一的汶川县城后山 2 条泥石流沟(南沟和羊岭沟)为例,应用所建立的评价模型对泥石流的冲出距离进行计算。2 条沟泥石流的发育背景与北川县泥石流的发育背景基本一致,均发育在强震区内,且汶川地震使得流域内发育有大量的崩塌和滑坡,为泥石流的发生提供了物源条件,属于受地震影响的典型泥石流沟。根据以上方法,通过对南沟和羊岭沟流域的坡度分析,确定出泥石流开始发生堆积的区域(坡度 < 10°的地区),并通过流域纵剖面线与流域最高点连线得到 2 条泥石流沟的堆积角和冲出角的值,最后将该值带入公式(1),得到南沟泥石流最远冲出距离为 1 060 m,羊岭沟泥石流最远冲出距离为 1 050 m(表 3)。

通过在分辨率为 0.5 m 的高分辨率遥感影像上对南沟的泥石流可能堆积区长度(海拔 1 340 ~ 1 400 m)进行测量,得到该段的长度为 700 m;羊岭

沟泥石流可能堆积区长度为 930 m。根据评价模型的计算误差值,对于流域面积 > 5 km<sup>2</sup> 的流域,冲出距离的计算误差为 11%,计算得到的冲出距离需要减去误差值。通过计算后得到,南沟的泥石流的冲出距离为 940 m(大于现有的堆积区长度 700 m)、羊岭沟泥石流的冲出距离为 930 m(大于现有的堆积区长度 770 m),这说明,2 条沟一旦暴发泥石流,泥石流就会进入岷江,并能造成一定程度的堵江。

4 结论

1. 通过对地震区内泥石流冲出距离的统计分析表明,泥石流冲出角随着流域面积的增大而减小,相应地,泥石流冲出距离与流域面积也呈反比关系。这表明,泥石流冲出距离与流域面积和流域相对高差之间存在着显著的对应关系,根据不同流域面积的大小分类确定泥石流冲出距离预测模型中系数的取值范围是可取的。

2. 从文中提出的预测模型可以看出,采用预测模型得到的泥石流冲出距离要比实际冲出距离大 4% ~ 11% 的长度。这主要是因为预测模型将泥石流沟道微地貌变化特征假设为理想化,不考虑它们对泥石流冲出距离的影响。而实际上,泥石流冲出距离除了受到流域相对高差和流域面积的影响外,还与沟道的弯曲程度、微地貌变化及泥石流重度等因素有着很密切的联系,这些因素都会在一定程度上减小泥石流的冲出距离。

3. 由于评价方法及评价模型是基于“5. 12”汶川地震区的暴雨泥石流特征统计的基础上,故该方法仅适用于汶川地震区泥石流最远冲出距离的预测。由于目前尚缺乏足够的地震区泥石流资料来验证模型的有效性,尤其是在不同流域面积条件下泥石流冲出距离的验证,故该预测方法的合理性还有待进一步探讨。

表 3 汶川县城泥石流冲出距离评价结果

Table 3 The predication distance in Wenchuan

沟 名	流域面积 /km <sup>2</sup>	流域相对 高差/m	堆积角 $\beta$ /°	计算得到的 冲出角 $\alpha$ /°	堆积区实际 长度/m	预测堆积区 长度/m	修正误差 系数/%	修正后的冲 出距离/m
南沟	6.8	1 840	14	11	700	1 060	11	940
羊岭沟	5.8	1 020	22	17.6	770	1 050	11	930

## 参考文献 (References)

- [1] Tang Chuan, Tie Yongbo. Reconnaissance and analysis on the rain-storm induced debris flow in Weijiagou 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]
- [2] Tang Chuan, Liang Jingtao. Characteristic of debris flows in Beichuan Epicenter of the Wenchuan Earthquake triggered by rainstorm on September 24, 2008[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(6): 642 - 630 [唐川, 梁京涛. 汶川震区北川 9.24 暴雨泥石流特征研究[J]. *工程地质学报*, 2008, 16(6): 642 - 630]
- [3] Liu Xilin, Tang Chuan. Debris flow hazard assessment[M]. Beijing: Scientific Press, 1995 [刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 1995]
- [4] Liu Xilin, Zhang Songlin, Tang Chuan. Debris flow hazard area model experimentation [J]. *Geographic Research*, 1993, 12(2): 77 - 85 [刘希林, 张松林, 唐川. 泥石流危险范围模型实验[J]. *地理研究*, 1993, 12(2): 77 - 85]
- [5] Tang Chuan. Numerical simulation of debris flow inundation on the alluvial fans and its prediction model of the risk area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 8(1): 11 - 15 [唐川. 泥石流堆积泛滥过程的数值模拟及其危险范围预测模型研究[J]. *水土保持学报*, 1994, 8(1): 11 - 15]
- [6] Tang Chuan, Liu Xilin, Zhu Jing. The evaluation and application of risk degree for debris flow inundation on alluvial fans[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1993, 2(4): 79 - 84 [唐川, 刘希林, 朱静. 泥石流堆积泛滥区危险度的评价与应用[J]. *自然灾害学报*, 1993, 2(4): 79 - 84]
- [7] Clung M. Extreme avalanche runoff: a comparison of empirical models [J]. *Can. Geotech*, 2001, 38: 1254 - 1265
- [8] Lied K, Instantes B, Domaas U, et. al. Snow avalanche at Bleie, Ul-lensvang, January 1994 [J]. *Norwegian Geotechnical Institute Publication*, 1998, 203: 175 - 181
- [9] Clung M, Lied K. Statistical and geometrical definition of snow avalanche runoff [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1987, 13(2): 107 - 119
- [10] Hung O, Morgan G, Van D, et al. Debris flow defenses in British Columbia. *Reviews in Engineering Geology* [G]//Volume VII, Debris flows/avalanches: Process, recognition, and mitigation. The Geological Society of America, Boulder, Colorado, 1987: 201 - 222
- [11] Melelli A, Taramel C. An example of debris-flows hazard modeling using GIS[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2004, (4): 1 - 12
- [12] Liao Yumin. *Geologic hazards warning and emergency commanding* [M]. Haerbin: Haerbin Cartographic Publishing House, 2003 [廖育民. 地质灾害预报预警与应急指挥及综合防治实务全书[M]. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2003]
- [13] Liu Xilin. Several geomorphic evidences of debris flow Gully[J]. *Journal of Hazard*, 1987, (4): 27 - 32 [刘希林. 泥石流地貌标志的初步探讨[J]. *灾害学*, 1987, (4): 27 - 32]
- [14] Dwain B. Risk assessment procedure for proposed resource development activities above alluvial and debris torrent fans[R]. 2004

## Predication of Rainstorm-induced Debris Flow Runout Distance

TIE Yongbo<sup>1,2</sup>, TANG Chuan<sup>2</sup>, NI Huayong<sup>1</sup>

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** How to identifying the potential danger zone is an important foundation for post-disaster reconstruction and debris flow mitigation planning in Wenchuan earthquake zone. Based on the survey and run-out distance statistics of 72 debris flows which occurred in Beichuan on 24 September 2008, four months after the "5. 12" Wenchuan earthquake, this paper promote the debris flow run-out distance predication model according to the classification of debris flow catchments area, and give the corresponding parameter values. Finally, apply the model to predication the potential run-out distance in two debris flow gully located in Wenchuan country, the result show that the distance value calculated by this method is larger than the real run-out distance, the mean value of error was between 4% ~ 11%, this d-value is reasonable for debris flow run-out distance predication.

**Key words:** debris flow; runout distance; predication model Wenchuan seismic zone

作者: [铁永波](#), [唐川](#), [倪化勇](#), [TIE Yongbo](#), [TANG Chuan](#), [NI Huayong](#)  
作者单位: [铁永波, TIE Yongbo\(成都地质矿产研究所, 四川, 成都, 610081; 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川, 成都, 610059\)](#), [唐川, TANG Chuan\(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川, 成都, 610059\)](#), [倪化勇, NI Huayong\(成都地质矿产研究所, 四川, 成都, 610081\)](#)  
刊名: [山地学报](#) **ISTIC PKU**  
英文刊名: [JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE](#)  
年, 卷(期): 2011, 29(2)  
被引用次数: 1次

## 参考文献(14条)

1. [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](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2009(05)
2. [唐川;梁京涛](#) [汶川震区北川9.24暴雨泥石流特征研究](#)[期刊论文]-[工程地质学报](#) 2008(06)
3. [刘希林;唐川](#) [泥石流危险性评价](#) 1995
4. [刘希林;张松林;唐川](#) [泥石流危险范围模型实验](#) 1993(02)
5. [唐川](#) [泥石流堆积泛滥过程的数值模拟及其危险范围预测模型研究](#) 1994(01)
6. [唐川;刘希林;朱静](#) [泥石流堆积泛滥区危险度的评价与应用](#) 1993(04)
7. [Clung M](#) [Extreme avalanche runout:a comparison of empirical medels](#) 2001
8. [Lied K;Instantes B;Domaas U](#) [Snow avalanche at Bleie,Ullensvang, January 1994](#) 1998
9. [Clung M;Lied K](#) [Statistical and geometrical definition of snow avalanche runout](#) 1987(02)
10. [Hungr O;Morgan G;Van D](#) [Debris flow defenses in British Columbia.Reviews in Engineering Geology Volume VII,Debris flows/avalanches:Process,recognition,and mitigation](#) 1987
11. [Melelli A;Taramel C](#) [An example of debris-flows hazard modeling using CIS](#) 2004(04)
12. [廖育民](#) [地质灾害预报预警与应急指挥及综合防治实务全书](#) 2003
13. [刘希林](#) [泥石流地貌标志的初步探讨](#) 1987(04)
14. [Dwain B](#) [Risk assessment procedure for proposed resource development activities above alluvial and debris torrent fans](#) 2004

## 本文读者也读过(10条)

1. [周富春](#), [刘立平](#) [紊流性泥石流对渡槽的作用力分析](#)[期刊论文]-[重庆大学学报\(自然科学版\)](#)2001, 24(5)
2. [彭亚明](#), [彭军还](#), [张彬](#), [王磊](#) [三峡库区某滑坡抗剪强度参数的反演分析](#)[期刊论文]-[桂林工学院学报](#)2003, 23(3)
3. [谢修齐](#), [沈寿长](#), [Xie Xiuqi](#), [Shen Shouchang](#) [一种采用输移浓度为主要参数的泥石流流量计算新方法](#)[期刊论文]-[中国铁道科学](#)2000, 21(3)
4. [唐红梅](#), [陈洪凯](#), [TANG Hong-mei](#), [CHEN Hong-kai](#) [速流结构泥石流抛程理论分析与试验](#)[期刊论文]-[重庆大学学报\(自然科学版\)](#) 2007, 30(8)
5. [余斌](#), [YU Bin](#) [根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究](#)[期刊论文]-[沉积学报](#)2008, 26(5)
6. [宋子龙](#), [石江涛](#), [杨卓](#) [四清水库土坝下游滑坡反演分析](#)[期刊论文]-[水电能源科学](#)2003, 21(2)
7. [倪化勇](#), [郑万模](#), [唐业旗](#), [王伟德](#), [陈绪钰](#), [徐如阁](#), [宋志](#), [NI Hua-yong](#), [ZHENG Wan-too](#), [TANG Ye-qi](#), [WANG De-wei](#), [CHEN Xu-yu](#), [XU Ru-ge](#), [SONG Zhi](#) [绵竹清平8·13群发泥石流成因、特征与发展趋势](#)[期刊论文]-[水文地质工程地质](#) 2011, 38(3)
8. [白志勇](#), [BAI Zhi-yong](#) [泥石流松散物质启动条件的分析与计算](#)[期刊论文]-[西南交通大学学报](#)2001, 36(3)
9. [王涛](#), [石菊松](#), [吴树仁](#), [张永双](#), [李滨](#), [辛鹏](#), [孙萍](#), [WANG Tao](#), [SHI Jusong](#), [WU Shuren](#), [ZHANG Yongshuang](#), [LI Bin](#).

[XIN Peng, SUN Ping](#) [汶川地震触发文家沟高速远程滑坡-碎屑流成因机理分析](#)[期刊论文]-[工程地质学报](#)2010, 18(5)

10. [倪化勇, 郑万模, 唐业旗, 徐如阁, 王德伟, 陈绪钰, 宋志, NI Huayong, ZHENG Wanmo, TANG Yeqi, XU Ruge, WANG Dewei, CHEN Xuyu, SONG Zhi](#) [汶川震区文家沟泥石流成灾机理与特征](#)[期刊论文]-[工程地质学报](#)2011, 19(2)

#### 引证文献(1条)

1. [向灵芝, 崔鹏, 钟敦伦, 葛永刚, 朱兴华, 杨伟](#) [汶川地震区泥石流危害道路的定量分析——以汶川县肖家沟为例](#)[期刊论文]-[西南交通大学学报](#) 2012(3)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_sdx201102015.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201102015.aspx)