

# 沟道型滑坡-碎屑流运动距离经验预测模型研究\*

詹威威 黄润秋 裴向军 李为乐

(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) 成都 610059)

**摘要** 沟道型滑坡-碎屑流具有隐蔽性强、危险性高、力学机理复杂的特点,研究其运动距离预测模型具有重要的理论意义和实践意义。本文基于遥感 GIS 技术,结合野外调查,获取了汶川地震触发的 38 个沟道型滑坡-碎屑流的基础数据。通过相关性分析确定沟道型滑坡-碎屑流最大水平运动距离  $L$  的影响因素从大到小依次是滑坡体积  $V$ 、最大垂直运动距离  $H$ 、滑源区高差  $H_s$ 、沟道段坡度  $\beta$ 。采用逐步回归方法建立了滑坡-碎屑流最大水平运动距离  $L$  的最优多元回归模型,检验结果表明模型具有较高精度。将最优多元回归模型与国际上应用较多的滑坡运动距离和泥石流运动距离预测模型进行对比,表明考虑滑坡体积、地形落差和沟道段坡度的运动距离预测指标体系,具有最高的拟合优度和较好的物理含义,可为沟谷山区滑坡-碎屑流危险性评价提供参考依据。

**关键词** 滑坡-碎屑流 沟道型 运动距离 逐步回归 预测指标体系

中图分类号: P642.22 文献标识码: A

## EMPIRICAL PREDICTION MODEL FOR MOVEMENT DISTANCE OF GULLY-TYPE ROCK AVALANCHES

ZHAN Weiwei HUANG Runqiu PEI Xiangjun LI Weile

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

**Abstract** Prediction model for movement distance of rock avalanches has important theoretical significance and practical significance due to the characteristic of difficult detection, complex mechanism and high risk of gully-type rock avalanches. This study selects 38 typical rock avalanches induced by Wenchuan earthquake, and obtains their basic data based on the remote sensing and GIS technology combining with field investigation. Through correlation analysis, the results indicate that the influence factors of the maximum horizontal movement distance of rock avalanches ( $L$ ) are landslide volume ( $V$ ), the maximum vertical movement distance  $H$ , the elevation difference of slip source area ( $H_s$ ), and the mean slope angle of the lower channel ( $\beta$ ). Then a stepwise regression method is adapted to build optimal multiple regression model for the prediction of  $L$ . The validation shows that the multiple regression model is suitable for predicting rock avalanche hazardous zones in Wenchuan earthquake areas. The optimal multiple regression model and other internationally common-used prediction models are compared for the movement distance of landslides and debris flows. The result indicates that the forecast index system is suitable for the rock avalanches risk assessment in mountainous areas. The system considers the volume, drop height, the mean

\* 收稿日期: 2015-12-10; 收到修改稿日期: 2016-06-02.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB74470), 交通部科技项目(2014-215), 四川省科技厅科技支撑计划项目(2013FZ0009), 成都理工大学中青年骨干教师培养计划(JXGG201507) 资助。

第一作者简介: 詹威威(1992-), 男, 博士生, 研究方向为地质灾害研究与防治. Email: zhanweiwei132@163.com

slope of the channel, with better goodness of fit index and physical meaning.

**Key words** Rock avalanche, Gully type, Movement distance, Stepwise regression, Forecast index system

## 0 引言

滑坡-碎屑流是指滑坡或崩塌在运动过程中转化而成的碎屑流体,一般具有高速远程的特点(张明等,2010)。2008年汶川地震的强烈地震动促使高位的滑坡岩体在滑动前已产生一定程度的动力破碎,因而更易形成滑坡-碎屑流。例如,青川东河口滑坡滑体自高程约1000m处剪出后,抛射飞行160m后碰撞解体形成碎屑流,继续运动垂直方向约320m,水平方向1800m,导致下游几个村庄、780余人被埋(孙萍等,2009;许强等,2009);彭州谢家店子滑坡自高程1650m处剪出后,大量铲刮斜坡中下部的松散物质,沿沟道继续运动垂直方向约450m,水平方向约1400m,堵塞沱江支流金河(许强等,2009);清平文家沟滑坡自高程约1800m处剪出后,在圈闭沟谷中形成气固二相成分为主的碎屑流体,垂直方向继续运动约900m,水平方向约3200m,在文家沟内留下 $5000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的巨厚滑坡堆积体(黄河清等,2010)。上述实例表明,在沟谷山区发生的高位滑坡自滑源区剪出后,与山体发生相互作用动力裂解形成滑坡-碎屑流后,能够沿沟谷地形继续运动很远的距离,本文将其称为沟道型滑坡-碎屑流。沟道型滑坡-碎屑流的滑源区一般位于沟谷深处,具有很强的隐蔽性和极高的危险性。因此,构建沟道型滑坡-碎屑流运动距离预测指标体系和运动距离预测模型,对沟谷山区滑坡-碎屑流危险性评价及规划用地具有重要意义。

目前滑坡运动距离的预测方法主要有动力学模型和经验统计模型。动力学模型可细分为两类:①将滑体假设为刚体的质点运动模型,如雪橇模型(Heim,1932)、摩擦模型(Scheidegger,1973)、动力条分法(潘家铮,1980),这类方法较适用于滑体完整性较好的滑动型滑坡;②考虑滑体内部变形的连续或非连续分析方法,如等效流体模型(Hungr et al.,2009)、颗粒流模型(Lo et al.,2011)、光滑粒子动力学模型(Pastor et al.,2009)以及超孔隙水压力模型(Sassa,1988)等,国内学者吴凤元等(2013)、杜娟等(2015)也逐渐尝试采用连续性理论模拟分析滑坡运动。经验统计模型方面,国外Scheidegger最早建立滑坡视摩擦系数与滑坡体积的相关关系

(Scheidegger,1973),Lied等建立了只考虑地形坡度的 $\alpha\beta$ 模型(Lied et al.,1980),Finlay建立了考虑垂直落差、地形坡度的滑坡运动距离预测模型(Finlay et al.,1999)。国内学者李秀珍等建立了考虑滑坡体积、垂直滑动距离和原始斜坡坡角的滑坡滑距预测模型(李秀珍等,2010);樊晓一等在滑坡运动距离经验预测模型方面做了许多有意义的对比研究(樊晓一等,2012,2015)。滑坡-碎屑流是一种由固、液、气组成的多相集合体,其物理力学性质十分复杂,运动过程涉及空气润滑、液化、能量传递等复杂力学机理(张明等,2010)和碰撞解体、坡面铲刮、爬坡等复杂过程。针对滑坡-碎屑流运动距离预测,动力学模型存在力学模型和参数不易选取的局限性,经验模型具有参数易获取、模型易应用的优点,但已有的滑坡运动距离经验统计公式鲜有考虑沟道地形对运动距离的影响,因而有必要构建新的滑坡-碎屑流运动距离预测公式,以便开展汶川地震灾区滑坡-碎屑流危险范围预测工作。

本文主要针对山区沟道型滑坡-碎屑流,基于遥感GIS技术,结合野外调查,获取了汶川地震触发的38个沟道型滑坡-碎屑流的基础数据。通过相关性分析来确定滑坡-碎屑流运动距离的主要影响因素,采用逐步回归分析方法,来建立滑坡-碎屑流运动距离的最优回归模型,对比国际上常用的滑坡和泥石流运动距离预测模型,探讨沟谷山区滑坡-碎屑流运动距离预测指标体系。

## 1 研究区滑坡-碎屑流基本特征

研究区(图1)位于青藏高原东缘、四川盆地西部,属于松潘-甘孜地块与扬子地台之间的龙门构造带内。研究区内地质结构复杂,构造演化历史漫长,发育有NE-SW走向的3条大断裂,分别是龙门山后山大断裂(汶川-茂汶断裂)、龙门山中大断裂(映秀-北川断裂)、龙门山主边界断裂(灌县-彭县断裂)。研究区出露地层主要由志留系-泥盆系浅变质岩和前寒武系杂岩构成的变形变质构造地层带,由上古生界至三叠系沉积岩构成的变形变位构造地层带,由侏罗系至第三系红层构成的变形构造地层带(李勇等,2009)。研究区内地形地貌整体呈北西高、南东低的趋势,自西向东由构造侵蚀中高山

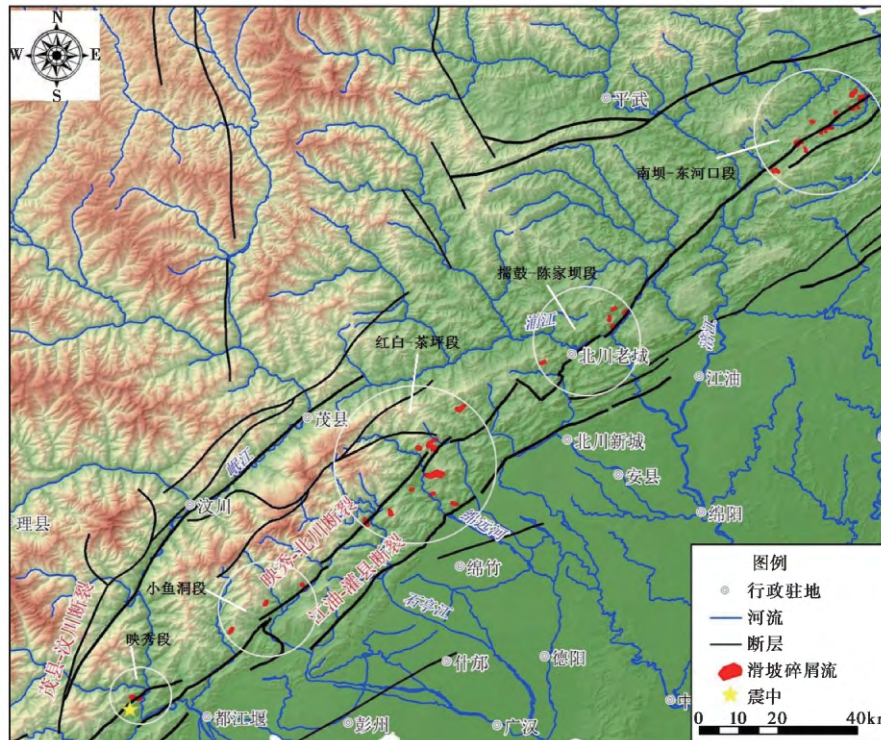


图1 汶川地震典型沟道型滑坡-碎屑流分布图

Fig. 1 Distribution map of large-scale rock avalanches triggered by Wenchuan earthquake

向中低山过渡,山地海拔在 600~3700m 之间。区内河流水系交错,降雨充足。

本文研究对象为汶川地震触发的 38 个沟道型的岩质滑坡-碎屑流。其基本沿发震断裂展布,距发震主断裂映秀-北川断裂的距离在 0~21300m 之间,平均值 3895m;集中分布在映秀-北川断裂带的局部错列、转折以及断裂活动的末端部位(图 1 中白色圆圈);地震烈度在 IX 度~XI 度范围内,区内有记录的最大地震加速度值出现在汶川卧龙台,EW 向 0.98g,NS 向 0.67g,UD 向 0.97g,中段绵竹清平台站记录到的地震加速度峰值为 EW 向 0.84g,NS 向 0.82g,UD 向 0.64g(于海英等,2009)。滑坡-碎屑流的滑源区出露岩性主要有碳酸盐岩、千枚岩、岩浆岩和砂岩 4 种。

研究区内滑坡-碎屑流具有清晰的滑源区边界,滑体自剪出口滑出后,直接进入沟道(图 2b)或以一定偏转角度进入沟道内(图 2a)。由于碎屑流体性质和地形地貌的差异,滑坡-碎屑流的堆积终点可能在沟道内(图 2a),也可能冲出沟口进入河道或者人类活动较多的平缓场地(图 2b)。产生这种差异的一个重要原因是沟道地形本身的复杂性,在单条沟道内,延伸方向、坡度、沟宽都可能发生较大变化。例如图 2a 中的近沟口段沟道方向有近 90°

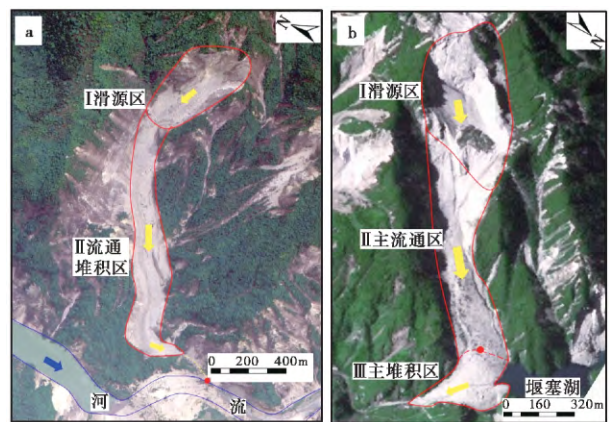


图2 典型沟道型滑坡-碎屑流遥感影像图

Fig. 2 Remote sensing images of typical rock avalanches

a.长滩; b.老鹰岩

的改变,且坡度降低、沟宽增加,导致碎屑流体最终堆积该段内;图 2b 中主沟形状呈直线型,且坡度较陡,滑坡-碎屑流体呈现“一冲到底”的特征。前者工程地质分区可分为滑源区和流通堆积区,滑源区发生斜坡物质减损,沟道是碎屑流体的主要流通通道和堆积区。后者工程地质分区可分为滑源区、主流通区和主堆积区,此类碎屑流体速度较快,主流通区内同时存在铲刮和堆积过程,主堆积区内堆积大部分滑体物质。

## 2 数据获取

典型的沟道型滑坡-碎屑流的示意图如图3所示,其运动路径上呈现两个典型的地形突变点,地形突变点1指滑坡运动路径上地形由斜坡转变为沟道的地形变化点,即斜坡段与沟道段分界点;地形突变点2指滑坡运动路径上地形由沟道转变为平缓场地的地形变化点,即沟道段和宽谷段分界点。斜坡段包括滑源区和陡坡加速区,沟道段为滑坡碎屑流的主流通区,宽缓段为滑坡碎屑流的主堆积区。

滑坡-碎屑流危险性评价的重要参数包括最大垂直运动距离、最大水平运动距离、堆积宽度、堆积厚度和运动速度;与上述因子密切相关的滑坡特征参数主要包括滑坡规模、地形地貌、滑体物质组成、含水状态等。本文研究对象均为汶川地震触发的岩质滑坡-碎屑流,忽略前期降雨对滑体性质的影响,主要研究滑坡体积 $V$ 、滑源区高差 $H_s$ 、斜坡段坡度 $\alpha$ 、沟道段坡度 $\beta$ 对滑坡-碎屑流最大垂直运动距离 $H$ 、最大水平运动距离 $L$ 的影响(图3)。

### 2.1 滑坡体积及最大运动距离

如图3所示,滑坡最大垂直运动距离 $H$ 、最大水

平运动距离 $L$ 指滑坡后缘顶点至堆积前缘之间的最大垂直落差和最大水平距离。滑坡体积是滑坡运动的重要影响因素,但震后能够进行详细勘察获取滑坡体积数据的滑坡数目十分有限,通过遥感解译获取滑坡面积,再应用经验公式估算滑坡体积的方法较为方便可行。本文主要利用地震后迅速获取的ALOS卫星影像(分辨率达10m)解译滑坡面积 $A$ 、最大水平运动距离 $L$ 和最大垂直运动距离 $H$ (表1)。然后,采用Parker于2011年的滑坡体积估算公式(Parker et al. 2011)估算得到滑坡体积:

$$V = 0.106A^{1.388} \quad (1)$$

其中, $V$ 为滑坡体积( $m^3$ ); $A$ 为滑坡面积( $m^2$ ),已有详细勘察资料的滑坡的体积数据以现场调查结果为准(表1)。

### 2.2 斜坡、沟道段坡度

地形地貌是滑坡运动的重要影响因素,但地形地貌具有复杂多变、难以量化的特点。本文主要研究斜坡段坡度、沟道段坡度对滑坡-碎屑流运动距的影响,将斜坡段坡度 $\alpha$ 定义为滑坡后缘顶点至地形突变点1之间的平均坡度,沟道段坡度 $\beta$ 定义为地形突变点1至地形突变点2之间的平均坡度。滑坡-碎屑流的地形坡度参数来源于DEM数据,其解

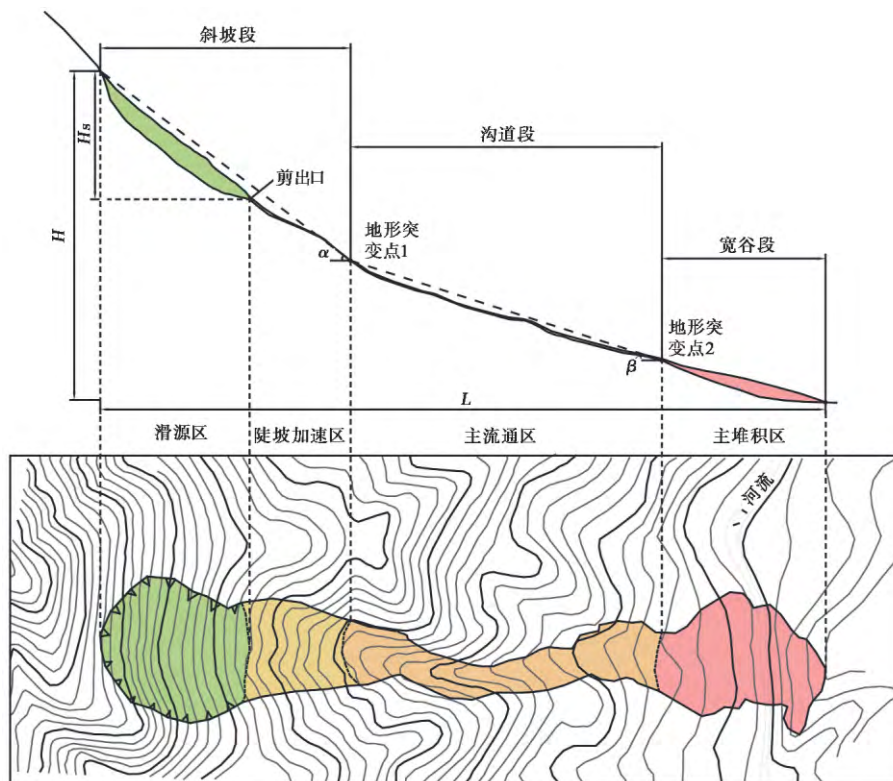


图3 典型沟道型滑坡-碎屑流的示意图

Fig. 3 Sketch map of typical gully-type rock avalanche

表 1 用于滑坡-碎屑流运动距离预测模型构建的因子数据

Table 1 Data of various factors for establishment of prediction model of rock avalanche movement distance

序号	滑坡名称	行政区域	经度 $l(^{\circ})$	纬度 $l(^{\circ})$	滑坡面积 $A/m^2$	滑坡体积 $V/m^3$	滑源区 高差 $H_s/m$	斜坡段 坡度 $\alpha/(^{\circ})$	沟道段 坡度 $\beta/(^{\circ})$	最大垂直 运动距离 $H_{max}/m$	最大水平 运动距离 $L_{max}/m$
1	文家沟	绵竹	104.140	31.552	3000566	5000000*	440	26	7	1320	4000
2	水磨沟	什邡	103.981	31.442	915608	19959932	490	35	10	860	2000
3	大屋基	安县	104.196	31.702	792190	16326032	540	29	13	880	1900
4	东河口	青川	105.113	32.410	1283627	1500000*	240	25	11	640	2400
5	红石沟	安县	104.130	31.624	687520	13410911	290	37	17	1040	2700
6	窝前	青川	104.964	32.308	695672	1200000*	330	30	10	560	1600
7	肖家山	绵竹	104.038	31.465	465899	7814385	480	48	24	930	1350
8	牛眠沟	汶川	103.456	31.044	527700	750000*	320	32	13	800	2640
9	立起沟	江油	105.207	32.169	355113	5360623	360	37	12	650	1500
10	草槽坪	安县	104.139	31.607	354046	5338279	345	31	17	580	1340
11	火石沟	安县	104.134	31.616	322155	4682742	270	38	17	700	1320
12	石板沟村	青川	105.090	32.419	496983	450000*	450	34	9	650	1800
13	谢家店子	彭州	103.841	31.298	294256	400000*	400	34	15	720	1600
14	大水沟	都江堰	103.675	31.199	241874	3145769	320	30	17	560	1400
15	长坪	彭州	103.754	31.259	224645	2839115	290	37	16	500	1200
16	小木岭	绵竹	104.102	31.613	218704	2735439	175	45	26	710	1025
17	柏树岭	北川	104.385	31.807	208968	2567895	335	36	20	620	1200
18	大湾	北川	104.536	31.907	203959	2482853	220	28	20	480	1000
19	曾家山	绵竹	104.182	31.486	198165	2385499	340	44	20	650	1135
20	石湊子	平武	104.918	32.243	169540	1921037	260	30	26	640	1200
21	长滩	绵竹	104.133	31.508	151094	1637197	400	33	25	1050	1650
22	红麻公	青川	104.962	32.301	144683	1541570	195	30	14	330	800
23	白果村	青川	105.088	32.385	139800	1469843	165	26	12	260	800
24	青龙村	青川	105.036	32.342	134079	1387013	90	21	11	200	600
25	彭家山	北川	104.546	31.930	127156	1288622	200	33	28	580	1000
26	龙湾村	北川	104.571	31.922	99821	920924	205	31	28	460	860
27	张正波	青川	105.017	32.333	99726	919717	125	29	15	320	800
28	杜家岩	青川	105.028	32.336	94769	856882	100	33	17	400	880
29	麻地坪	青川	104.996	32.355	94632	855159	140	27	31	395	740
30	岩碛窝	青川	105.099	32.391	92128	823909	145	30	26	390	800
31	窗子沟	绵竹	104.085	31.518	91717	818816	185	35	15	295	670
32	赵家山	青川	105.041	32.342	82329	704840	115	22	16	280	700
33	围子坪	青川	105.083	32.387	74661	615400	135	22	18	240	600
34	毛虫山 2#	平武	104.908	32.243	70251	565535	160	38	22	500	740
35	瓦前山	青川	105.049	32.376	70007	562808	135	24	18	250	620
36	木红坪	青川	104.982	32.291	68288	543718	175	28	20	420	970
37	大坪上	北川	104.542	31.889	65700	515331	160	34	29	365	640
38	柳树坪 2#	青川	105.054	32.365	54810	400724	150	29	16	240	580

上标符号“\*”表示滑坡体积数据引自许强(2009)中的野外调查结果

析度为 30m,采用 ARCGIS 空间分析功能分别提取斜坡段坡度和沟道段坡度(表 1)。

### 2.3 滑源区高差

滑源区高差  $H_s$  指滑坡后缘顶点至剪出口位置

的高程差(图 3)。本文通过结合遥感影像和现场调查的方法确定剪出口位置,进而计算出滑源区高差(表 1)。

### 3 滑坡-碎屑流运动距离预测模型构建

#### 3.1 建模思路

最大水平运动距离是滑坡-碎屑流危险范围预测最重要的参数,本文拟采用多元非线性回归方法构建滑坡-碎屑流的最大水平运动距离预测模型。滑坡碎屑流最大水平运动距离  $L$  的影响因子众多且因子之间可能存在共线性问题,即自变量之间存在线性关系或近似线性关系。自变量共线性问题将影响回归方程的稳定性,使某些自变量对因变量影响的显著性被隐藏起来(王岩等,2014)。本文为避免这些问题,先采用相关性分析法分析各变量之间的相关关系,筛选出对滑坡-碎屑流最大水平运动距离影响显著的变量。然后采用逐步回归方法构建最优回归方程。逐步回归分析法的思路是构建一个方差分析的统计量,给定显著性水平,采用双检验原则,逐步引入和剔除自变量,最终实现回归模型中没有显著变量可以引进或剔除,即得到最优回归方程(高惠璇,2000)。

#### 3.2 相关性分析

相关性分析是考察两个变量之间线性关系的一种统计方法。为分析滑坡-碎屑流运动距离的主要影响因素,本文采用 Pearson 相关系数(高惠璇,2000)计算公式计算分析各变量之间的相关系数  $r$ :

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中,  $x_i$  为变量  $x$  的取值;  $\bar{x}$  为样本平均值;  $y_i$  为变量  $y$  的取值;  $\bar{y}$  为样本平均值;  $|r| \geq 0.8$  为高度相关;  $0.5 \leq |r| < 0.8$  为中度相关;  $0.3 \leq |r| < 0.5$  为低度相关;  $|r| < 0.3$  为不相关。  $r > 0$  为正相关;  $r < 0$  为负相关。根据表1和式(2)计算出滑坡-碎屑流最大垂直运动距离  $H$ 、最大水平运动距离  $L$  同滑坡体积  $V$ 、斜坡段坡度  $\alpha$ 、沟道段坡度  $\beta$ 、滑源区高差  $H_s$  之间的相关系数表(表2)。结果表明,最大水平运动距离同滑坡体积、最大垂直运动距离之间具有高度的正相关关系,同滑源区高差之间中度正相关,同沟道段坡度之间低度负相关,同上段斜坡段坡度无显著相关关系。即滑坡-碎屑流最大水平运动距离的影响因素依次是滑坡体积、地形落差(最大垂直运动距离)、滑源区高差、沟道段坡度。为了

更清楚地分析各变量之间的相关关系,作得滑坡最大垂直运动距离与滑源区高差、滑坡体积、滑坡最大水平运动距离与滑坡体积、最大垂直运动距离的相关关系图(图4~图7)。

表2 滑坡碎屑流特征参数相关性分析结果

Table 2 Correlation analysis results for rock avalanches

	$V$	$\alpha$	$\beta$	$H_s$	$H$
$H$	0.713	0.429	(-0.130)	0.801	1
$L$	0.866	(0.082)	-0.467	0.675	0.857

括号表示这两个因子在显著性水平 0.05 条件下显著不相关

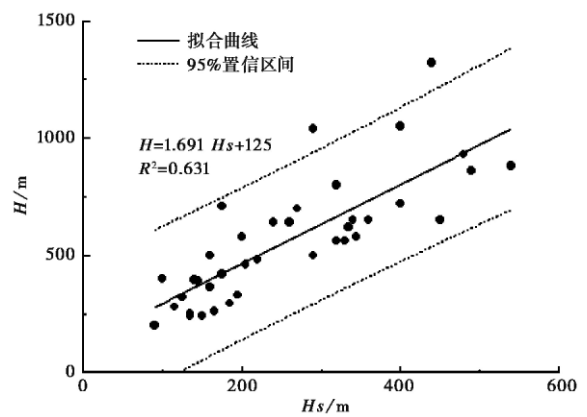


图4 汶川地震滑坡-碎屑流最大垂直运动距离和滑源区高差的相关关系

Fig. 4 Relationship between  $H$  and  $H_s$  for 38 rock avalanches induced by Wenchuan earthquake

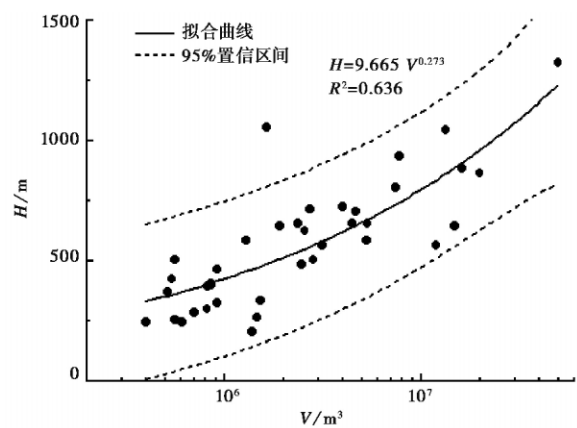


图5 汶川地震滑坡-碎屑流最大垂直运动距离和滑坡体积的相关关系

Fig. 5 Relationship between  $H$  and  $V$  for 38 rock avalanches induced by Wenchuan earthquake

由图4可知,滑坡-碎屑流最大垂直运动距离  $H$  比 1.69 倍滑源区高差值还要大,反映出沟谷山区滑坡-碎屑流高位剪出的特点。由图5、图6可知  $H$  与  $V$  之间、 $L$  与  $V$  之间均存在较好的幂函数关系,幂

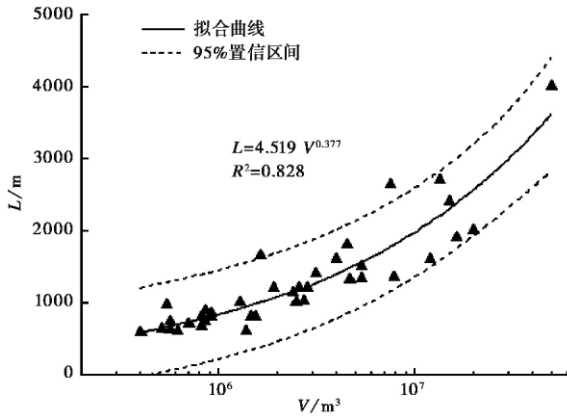


图6 汶川地震滑坡-碎屑流最大水平运动距离和滑坡体积的相关关系

Fig. 6 Relationship between  $L$  and  $V$  for 38 rock avalanches induced by Wenchuan earthquake

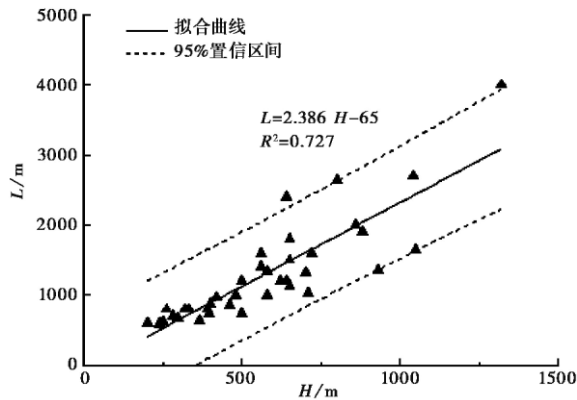


图7 汶川地震滑坡-碎屑流最大水平运动距离和最大垂直运动距离的相关关系

Fig. 7 Relationship between  $L$  and  $H$  for 38 rock avalanches induced by Wenchuan earthquake

指数分别为 0.273 和 0.377,表明  $V$  对  $L$  的影响比  $H$  的影响更显著。由图 7 知  $L$  与  $H$  之间存在较好的线性关系,表明地形落差是滑坡-碎屑流水平运动距离的重要影响因素。

### 3.3 最优多元回归模型

#### 3.3.1 模型选取

由表 1 可知,滑坡-碎屑流运动距离预测模型的自变量包括滑坡规模、高差和地形坡度 3 类因子,参数取值变化范围不一。因此,本文参考 P.J.Finlay 基于香港失稳边坡数据库建立的滑坡运动距离预测模型,建立滑坡-碎屑流运动距离的多元双对数线性预测模型:

$$\ln(Y) = a_0 + a_1 \ln(X_1) + a_2 \ln(X_2) + \dots + a_p \ln(X_p) + \varepsilon \quad (3)$$

其中,  $Y$  为因变量;  $X_1, X_2, \dots, X_p$  为自变量;  $\varepsilon$  为随机误差;  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$  为回归系数。

#### 3.3.2 模型构建

采用逐步回归的方法得到滑坡-碎屑流最大水平运动距离的最优回归模型  $L(V, H, \beta)$ :

$$\lg(L) = 0.420 + 0.079 \lg(V) + 0.718 \lg(H) - 0.365 \lg(\tan\beta) \quad (4)$$

变换形式得到滑坡-碎屑流最大水平运动距离的预测公式为:

$$L = 2.630 V^{0.079} H^{0.718} (\tan\beta)^{-0.365} \quad (5)$$

式(4)的检验统计量为:调整后  $R^2$  为 0.933,  $F$  值 173.54,显著性概率值  $P$  为 0.00,回归模型显著。

#### 3.3.3 改进的 $L(V, H_s, \alpha, \beta)$ 模型

滑坡最大垂直运动距离在滑坡发生前是未知的,而滑源区高差可通过前期调查获知。最大垂直运动距离  $H$  与滑源区高差  $H_s$ 、斜坡段坡度  $\alpha$  之间存在较高的相关关系(表 2),为便于模型的实际应用,本文引入自变量  $H_s, \alpha$  替换最优回归模型中的  $H$ ,建立方便应用的  $L(V, H_s, \alpha, \beta)$  模型如下:

$$L = 3.6 V^{0.303} H_s^{0.244} (\tan\alpha)^{-0.115} (\tan\beta)^{0.072} \quad (6)$$

式(6)的检验统计量为:调整后  $R^2$  为 0.840,  $F$  值 49.5,显著性概率值  $P$  为 0.00,回归模型显著。

作出式(5)、式(6)的计算值与实际值进行对比(图 8)可以发现:整体看来  $L(V, \beta, H)$  和  $L(V, H_s, \alpha, \beta)$  模型的预测精度都较高;  $L$  在 2000m 范围内,两个模型的计算值均接近实际值;当  $L$  超过 2000m 后,两个模型的计算值均低于实际值,误差较大的这 4 个滑坡依次是文家沟滑坡、红石沟滑坡、牛眠沟滑坡和东河口滑坡,现场调查结果表明这 4 个滑坡在进入沟道之前均经历了一个抛射飞行、碰撞解体的作用过程,抛射垂直距离分别是 260m、150m、60m、160m,流通区、堆积区内流态化特征明显。由此表明,当剪出口下方存在陡坡地形,将导致滑坡在运动初期经历抛射飞行和同迎面山体碰撞解体的过程,促进滑坡转化成碎屑流,运动能力增强,导致最大水平运动距离实际值超出预测值较大范围。

#### 3.4 模型验证

为了检验上述模型的可靠性,本文选用了其他文献中记录的滑坡-碎屑流(表 3)。这 4 个滑坡都是位于汶川地震 XI 烈度区的同震滑坡,滑坡体积变化范围为  $8.8 \times 10^4 \text{ m}^3 \sim 71.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。表 3 所示的验证结果表明,式(5)计算得到的滑坡-碎屑流最大水平运动距离预测值  $L'_{(5)}$  与实际值  $L$  的相对误差在

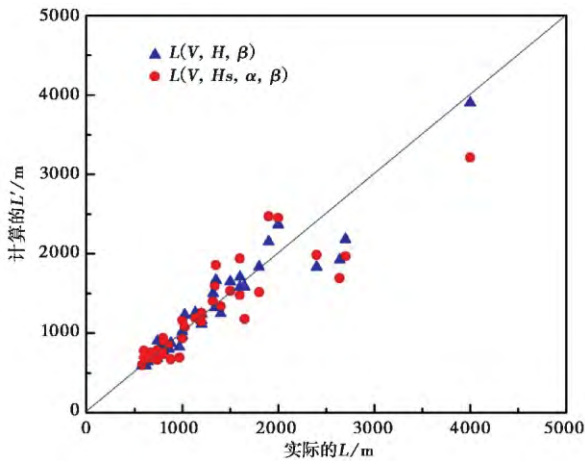


图8 式(5)、式(6)计算值与实际值L的比较  
Fig. 8 Comparison between calculated values using formula (5)、(6) and actual L value

2.3%到17.2%之间,式(6)计算得到的运动距离预测值  $L_{(6)}$  与实际值  $L$  的相对误差在-7.6%到17.9%之间,均能够较好地满足沟谷山区滑坡-碎屑流运动距离预测的精度要求。

### 4 讨论

沟谷山区高位斜坡经历长期地质构造作用和风化作用,地质结构破碎,很容易形成滑坡、崩塌;当滑源区下方为深切沟谷地形时,崩滑体高位启动后进入沟道内很容易转化成碎屑流继续运动。此类沟道型滑坡-碎屑流的最大水平运动距离存在诸多影响因素,其预测指标体系不同于滑动型滑坡或完全流态的泥石流。从实践角度来看,有必要探讨沟谷山区滑坡-碎屑流运动距离预测模型同滑坡、泥石流运动距离预测模型的区别。本文将建立的滑坡-碎屑流运动距离最优多元回归模型与国际上应用较多的滑坡运动距离预测模型和泥石流运动距离预测模型进行对比,探讨沟谷山区滑坡-碎屑流运动能力和运动距离预测指标体系。

表3 滑坡-碎屑流多元回归模型检验结果

Table 3 Background parameters of 4 rock avalanches used for validation

滑坡名称	经度	纬度	$V$ $/\times 10^4 \text{ m}^3$	$\alpha$ $/(\text{ }^\circ)$	$\beta$ $/(\text{ }^\circ)$	$H_s$ $/\text{ m}$	$H$ $/\text{ m}$	$L$ $/\text{ m}$	$L_{(5)}$ $/\text{ m}$	误差 $/\%$	$L_{(6)}$ $/\text{ m}$	误差 $/\%$
北川偏桥子	104°22'12.48"E	31°49'19.16"N	8.8	35	19	153	205	372	436	17.2	373	0.3
北川杨家岩	104°19'42.24"E	31°45'16.34"N	25.4	41	23	164	304	518	583	12.5	518	0.1
汶川杉树林	103°30'27.87"E	31°10'50.74"N	27.9	34	25	340	433	715	731	2.3	660	-7.6
汶川福烟沟	103°30'02.13"E	31°25'17.39"N	71.9	38	28	385	530	763	869	13.8	900	17.9

$L_{(5)}$  代表式(5)的计算值;  $L_{(6)}$  代表式(6)的计算值

#### 4.1 同滑坡运动距离模型对比

P.J.Finlay 基于 515 个香港挖方边坡破坏的数据(体积变化范围  $0.5 \sim 7168 \text{ m}^3$ ),建立了如下形式的滑坡运动距离预测模型(Finlay et al.,1999):

$$\lg L = 0.109 + 1.010 \times \lg H - 0.506 \lg(\tan \alpha) \tag{7}$$

变换形式得到:

$$L = 1.285 H^{1.010} (\tan \alpha)^{-0.506} \tag{8}$$

本文采用类似的形式建立了滑坡碎屑流的运动距离预测公式为:

$$\lg L = -0.070 + 1.099 \times \lg H - 0.705 \times \lg(\tan \alpha), \tag{9}$$

$(R^2 = 0.862)$

变换形式得到:

$$L = 0.851 H^{1.099} (\tan \alpha)^{-0.705} \tag{10}$$

对比式(8)、式(10)发现,地形落差(最大垂直运动距离  $H$ )对小型滑坡和大型滑坡-碎屑流的运动距离的影响都十分显著,且对滑坡-碎屑流运动距离的影响更为显著。两类滑坡都是以岩块集合体或碎屑流体的形式运动,主要区别在于开挖边坡滑源区下方为开阔地形,而本文研究的沟道型滑坡-碎屑流的滑源区下方为沟道地形,这种沟道地形的约束导流作用是造成两者水平运动距离差异的一个原因。例如取  $\alpha = 30^\circ$   $H$  在 100m 到 1000m 范围内变化时,式(10)计算的滑坡-碎屑流运动距离是式(8)计算的滑坡运动距离的 1.11~1.37 倍之间,放大倍数随  $H$  增大而增大。

#### 4.2 同泥石流运动距离模型对比

Lorente 等根据西班牙 Pyrenean 地区的泥石流数据,建立了如下形式的泥石流运动距离预测模型(Lorente et al.,2003):

$$L = 7.13(VH)^{0.271} \tag{11}$$

本文采用类似的形式建立的滑坡-碎屑流运动距离预测公式为:



$$L = 3.041(VH)^{0.283}, (R^2 = 0.896) \quad (12)$$

式中,  $VH$  为一定程度上的总能量的物理学含义, 对比式(11)、式(12)可知, 在不考虑地形坡度情况下, 两个公式的能量衰减指数接近(分别是 0.271 和 0.283), 同等规模、地形落差条件下, 泥石流的水平运动距离可接近滑坡-碎屑流水平运动距离的 2.3 倍。值得注意的一点是, 泥石流是一种固、液二相流, 其产生流动的临界坡度较低, 而滑坡-碎屑流主要是一种固相流体, 其产生流动的临界坡度应较高, 即在一定坡度的沟道地形上, 滑坡-碎屑流主要发生减滞堆积作用, 而泥石流能继续流动。这种“流动”能力上的差异是造成泥石流均能在沟口形成堆积扇而滑坡-碎屑流不一定能冲出沟口(图 2a)的根本原因。

#### 4.3 沟谷山区滑坡-碎屑流运动距离预测指标体系

回归模型的调整确定系数  $R^2$  值计算公式考虑到了模型的自变量个数和样本数目, 可以用来比较不同形式的回归模型的拟合优度, 调整  $R^2$  越接近于 1, 回归模型拟合优度越高。对比式(5)、式(8)和式(12)的调整  $R^2$  可知, 考虑滑坡体积、地形落差和沟道段坡度的滑坡-碎屑流运动距离预测式(5)具有最高的拟合优度。沟道型滑坡碎屑流运动距离与体积之间呈高度正相关, 表明碎屑流体在狭窄的沟道地形内表现为碎屑流体的扩散堆积作用。地形落差代表滑体的潜在势能, 地形落差越大, 滑坡体所获得的动能越大, 运动距离越远。运动距离随沟道段坡度增加而有所降低, 推测其原因为滑坡自高位启动沿斜坡面加速运动至沟道内时, 已获得较高的速度, 此后主要为碎屑流体沿沟道的扩散堆积作用, 随着沟道段坡度增加, 碎屑流体将更快完成扩散堆积, 因而运动距离变短。

综合考虑认为, 本文建立的考虑滑坡体积、地形落差和沟道段坡度的滑坡-碎屑流运动距离预测指标体系, 具有最高的拟合优度和较好的物理含义, 可用于滑坡-碎屑流运动的理论研究。改进的考虑滑坡体积、滑源区高差、斜坡段坡度和沟道段坡度的预测指标体系具有滑坡发生前全部自变量可获取、预测精度较高的优点, 可用于研究区内的滑坡-碎屑流危险范围的初步预测。

## 5 结 论

本文基于遥感 GIS 技术, 结合野外调查, 获取了

汶川地震触发的 38 个典型滑坡-碎屑流的基础数据。通过统计分析和对比讨论, 获得了以下主要结论:

(1) 通过相关性分析确定滑坡-碎屑流最大水平运动距离的影响因素依次是滑坡体积、地形落差、滑源区高差、沟道段坡度。

(2) 通过逐步回归方法建立了滑坡-碎屑流最大水平运动距离的最优多元回归模型, 通过代换自变量的方法得到改进的多元回归模型, 检验结果显示两个回归模型均具有较高的预测精度, 可以在汶川震区进行应用。误差分析结果表明滑坡在运动初期的抛射、碰撞、解体过程, 将显著增大滑坡-碎屑流的运动距离。

(3) 考虑滑坡体积、地形落差和沟道段坡度的运动距离预测指标体系, 具有最高的拟合优度和较好的物理含义, 可用于滑坡-碎屑流运动的理论研究。

## 参 考 文 献

- Du J, Yin K L, Wang J J. 2015. Simulation of three-dimensional movement of landslide-debris flow based on finite volume method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, **34**(3): 480~488.
- Fan X Y, Qiao J P, Han M et al. 2012. Volumes and movement distances of earthquake and rainfall-induced catastrophic landslides[J]. Rock and Soil Mechanics, **33**(10): 3051~3058.
- Fan X Y, Leng X Y, Duan X D. 2015. Influence of topographical factors on movement distances of toe-type and turning-type landslides triggered by earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, **36**(5): 1380~1388.
- Finlay P J, Mostyn G R, Fell R. 1999. Landslide risk assessment: prediction of travel distance[J]. Canadian Geotechnical Journal, **36**(3): 556~562.
- Gao H X. 2000. Some method on treating the collinearity of independent variables in multiple linear regression[J]. Application of Statistics and Management, **20**(5): 49~55.
- Helm A. 1932. Bergsturz und Menschenleben. Fretz & Wasmuth, Ziirich [J]. Landslides and Human Lives: 218.
- Huang H Q, Zhao Q H. 2010. Basic characteristics and preliminary mechanism analysis of large scale rockslide-sturzstrom at Wenjiagou triggered by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, **18**(2): 168~177.
- Hung O, McDougall S. 2009. Two numerical models for landslide dynamic analysis[J]. Computers & Geosciences, **35**(5): 978~992.
- Li X Z, Kong J M. 2010. Runout distance estimation of landslides triggered by “5·12” Wenchuan earthquake[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), **42**(5): 243~249.

- Li Y ,Huang R Q ,Zhou R J ,et al. 2009. Geological background of Longmen Shan seismic belt and surface ruptures in Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology* ,**17**( 1) : 3~18.
- Lied K , Bakkehøi S. 1980. Empirical calculations of snow - avalanche run-out distance based on topographic parameters [J]. *Journal of Glaciology* ,**26**( 94) : 165~177.
- Lo C M ,Lin M L ,Tang C L ,et al. 2011. A kinematic model of the Hsiaolin landslide calibrated to the morphology of the landslide deposit [J]. *Engineering Geology* ,**123**( 1-2) : 22~39.
- Lorente A ,Beguirua S ,Garcia-Ruiz J M. 2003. Flow characteristics and relationships in the central Spanish Pyrenees [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences* ,**3**: 683~692.
- Pan J Z. 1980. Stability against sliding of constructions and landslide analyses [M]. Beijing: China Water Power Press: 1~238.
- Parker R N ,Densmore A L ,Rosser N J ,et al. 2011. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth [J]. *Nature Geoscience* ,**4**( 7) : 449~452.
- Pastor M ,Haddad B ,Sorbino G , et al. 2009. A depth - integrated , coupled SPH model for flow-like landslides and related phenomena [J]. *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics* ,**33**( 2) : 143~172.
- Sassa K. 1988. Geotechnical model for the motion of landslides [C]//AA Balkema. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Landslide. Rotterdam [s.n.]: 37~55.
- Scheidegger A E. 1973. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering* ,**5**( 4) : 231~236.
- Sun P ,Zhang Y S ,Yin Y P ,et al. 2009. Discussion on long run - out sliding mechanism of Donghekou landslide-debris flow [J]. *Journal of Engineering Geology* ,**17**( 6) : 737~744.
- Wang Y ,Sui S L. 2014. Mathematical Statistics and Data Analysis using MATLAB Software [M]. Beijing: Tsinghua University Press: 1~362.
- Wu F Y ,Fan Y Y ,Liang L ,et al. 2013. Simulation analysis of landslide motion process based on the dynamic slice method [J]. *Journal of Sichuan University( Engineering Science Edition)* ,**45**( S1) : 7~12.
- Xu Q ,Pei X J ,Huang R Q. 2009. Large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [M]. Beijing: Science Press: 1~473.
- Yu H Y ,Wang D ,Yang Y Q ,et al. 2009. The preliminary analysis of strong ground motion records from the  $M_s$ 8.0 Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of earthquake engineering and engineering vibration* ,**29**( 1) : 1~13.
- Zhang M ,Yin Y P ,Wu S R ,et al. 2010. Development status and prospects of studies on kinematics of long runout rock avalanches [J]. *Journal of Engineering Geology* ,**18**( 6) : 805~817.
- 杜娟 殷坤龙 王佳佳. 2015. 基于有限体积法的滑坡-碎屑流三维运动过程模拟分析 [J]. *岩石力学与工程学报* ,**34**( 3) : 480~488.
- 樊晓一 乔建平 韩萌 等. 2012. 灾难性地震和降雨滑坡的体积与运动距离研究 [J]. *岩土力学* ,**33**( 10) : 3051~3058.
- 樊晓一 冷晓玉 段晓冬. 2015. 坡脚型与偏转型地震滑坡运动距离及地形因素作用 [J]. *岩土力学* ,**36**( 5) : 1380~1388.
- 高惠璇. 2000. 处理多元线性回归中自变量共线性的几种方法——SAS/STAT 软件( 6.12) 中 REG 等过程增强功能的使用 [J]. *数理统计与管理* ,**20**( 5) : 49~55.
- 黄河清 赵其华. 2010. 汶川地震诱发文家沟巨型滑坡-碎屑流基本特征及成因机制初步分析 [J]. *工程地质学报* ,**18**( 2) : 168~177.
- 李秀珍 孔纪名. 2010. “5·12”汶川地震诱发滑坡的滑动距离预测 [J]. *四川大学学报( 工程科学版)* ,**42**( 5) : 243~249.
- 李勇 黄润秋 周荣军 等. 2009. 龙门山地震带的地质背景与汶川地震的地表破裂 [J]. *工程地质学报* ,**17**( 1) : 3~18.
- 潘家铮. 1980. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析 [M]. 北京: 水利出版社: 1~238.
- 孙萍 张永双 殷跃平 等. 2009. 东河口滑坡-碎屑流高速远程运移机制探讨 [J]. *工程地质学报* ,**17**( 6) : 737~744.
- 王岩 隋思涟. 2014. 数理统计与 MATLAB 数据分析 [M]. 北京: 清华大学出版社: 1~362.
- 吴凤元 樊赞赞 梁力 等. 2013. 基于动力条分法的滑坡运动过程模拟分析 [J]. *四川大学学报( 工程科学版)* ,**45**( S1) : 7~12.
- 许强 裴向军 黄润秋 等. 2009. 汶川地震大型滑坡研究 [M]. 北京: 科学出版社: 1~473.
- 于海英 王栋 杨永强 等. 2009. 汶川 8.0 级地震强震动加速度记录的初步分析 [J]. *地震工程与工程振动* ,**29**( 1) : 1~13.
- 张明 殷跃平 吴树仁 等. 2010. 高速远程滑坡-碎屑流运动机理研究发展现状与展望 [J]. *工程地质学报* ,**18**( 6) : 805~817.