

# 汶川震区滑坡堆积体坡面侵蚀量测算方法\*

陈展鹏<sup>1</sup> 雷廷武<sup>1</sup> 晏清洪<sup>1</sup> 胡恒<sup>2</sup> 熊明彪<sup>2</sup> 李振林<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 四川省水土保持生态环境监测总站, 成都 610041;

3. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** 在汶川县选取典型滑坡堆积体, 采用三维激光扫描仪实地测量滑坡堆积体形态, 用图像分析方法鉴别沟道, 用于估算堆积体形成后的土壤侵蚀量。根据滑坡堆积体坡面实测点云数据, 采用最小二乘法拟合二次曲线, 近似为堆积体坡面沟道各横截面发生侵蚀前的坡面线。结合堆积体发生侵蚀后的坡面沟道实测数据, 测算各段沟道侵蚀量后估算出滑坡堆积体坡面侵蚀总量。典型滑坡堆积体坡面侵蚀总量为 355 m<sup>3</sup>。采用传统断面法对计算结果进行验证的结果表明, 拟合断面法计算的各分段侵蚀沟体积略大于传统断面法计算结果, 相对误差为 15.6%。5 条分段沟道中最大相对误差为 27.1%, 最小相对误差为 7.9%, 拟合断面法计算侵蚀沟体积的精度较好。

**关键词:** 滑坡堆积体 坡面沟蚀 侵蚀量测算

**中图分类号:** S152 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0195-06

## 引言

汶川地震形成了大量滑坡堆积体, 在降雨的作用下堆积体坡面形成大量的侵蚀沟。以堆积体坡面侵蚀产生的泥沙为主要类型的新增水土流失, 抬高河床, 淤积河道, 为山洪和泥石流等灾害提供了大量固体物质来源, 给震区居民的正常生活、生产造成严重威胁, 形成巨大的安全隐患。

在野外测算侵蚀沟体积最常用的方法是断面法<sup>[1]</sup>。断面法通过测量侵蚀沟若干典型横截面的面积, 用面积乘以对应的沟长计算侵蚀沟的体积, 从而确定该时间点之前的沟蚀量<sup>[2-3]</sup>。使用断面法测算侵蚀沟体积时一般根据实际需求, 选取不同的测量手段。传统的手段测量过程需要付出大量的人力和时间, 不适合在大区域的调查评估中使用<sup>[4-14]</sup>。遥感影像解译与航空摄影测量技术<sup>[15-16]</sup>, 以及先进的机载 LiDAR (Light detection and ranging) 技术<sup>[17]</sup>都能够快速高效的获得较大区域的 DEM (Digital elevation model), 并提取出侵蚀沟的断面尺寸和长度。但是相比传统测量手段, 使用这些技术获取的数据精度不够高, 并且高昂的成本也同样限制了其使用范围。

堆积体坡面的地势陡峻、物质松散, 很难攀爬和架设仪器, 所以传统接触式测量手段不适合在震区

开展测量工作。三维激光扫描仪能够快速、精细、非接触测量, 高效获取被测区域的地形数据, 适合在地震区域开展测量工作。我国学者已采用三维激光扫描仪在确定坡面土壤侵蚀量<sup>[18-19]</sup>、分析侵蚀沟发育过程与形态演变<sup>[20-21]</sup>以及开展水土流失监测<sup>[22-23]</sup>等领域进行了部分研究。用三维激光扫描仪测量滑坡堆积体的坡面侵蚀量, 通常的做法是选取固定的控制点, 在不同时间点对堆积体进行扫描, 建立不同时间点的 DEM。根据堆积体坡面在不同时间点的 DEM, 计算其对应时段内的坡面侵蚀量<sup>[24]</sup>。但震区滑坡堆积体坡面发生侵蚀前的原始坡面信息无法获得, 只有将原始坡面确定, 才能测算其体积。本研究在采用三维激光扫描仪实测的基础上, 以尚未发生侵蚀且外形规整的滑坡堆积体坡面形态为依据, 以滑坡堆积体坡面没有发生明显侵蚀区域的实测数据为基础, 采用最小二乘曲线拟合法, 计算出堆积体发生侵蚀之前的原始坡面线。再结合坡面侵蚀沟断面的实测数据, 采用断面法计算滑坡堆积体坡面侵蚀量。

## 1 研究区概况与现场测量

### 1.1 研究区概况

汶川县位于四川省阿坝州境内东南部, 距离成都市 146 km (图 1a)。县境东西宽 84 km, 南北长

收稿日期: 2013-04-22 修回日期: 2013-05-19

\* 国家自然科学基金资助项目(41271291)和水利部公益性行业科研专项经费资助项目(200901050)

作者简介: 陈展鹏, 博士生, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究, E-mail: crazp@126.com

通讯作者: 雷廷武, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治和农业水土工程研究, E-mail: leitingwu@cau.edu.cn

105 km,总面积 4 083 km<sup>2</sup>,介于北纬 30°45′~31°43′与东经 102°51′~103°44′之间。汶川县总体地势西北高东南低,地势高差悬殊,超过 2 000 m。岷江由县北部入境,长达 88 km,在县内的主要支流为杂谷脑河、草坡河、寿江。国道 213 汶川—映秀段沿线的岷江河面宽度一般在 80~100 m 左右,汛期主要为降水补给,枯季为融雪和地下水补给。通过

实地考察和地震前、后卫星影像对比发现,国道 213 汶川—映秀段沿线山体和地表破碎极其严重,产生了大量崩塌和滑坡堆积体,是受崩塌和滑坡影响极为严重的区域。滑坡堆积体结构松散,表面裸露,在暴雨和地表径流的作用下产生严重的坡面侵蚀。图 1b 中给出典型滑坡堆积体 WC-25 的地理位置。

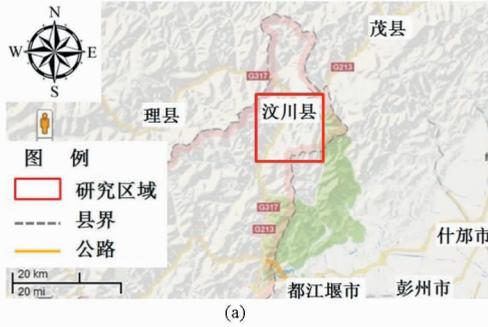


图 1 研究区概况图

Fig.1 Extent of study area image

(a) 汶川县地理位置概况图 (b) 国道 213 沿线概况图

### 1.2 典型滑坡堆积体现场测量

现场测量使用瑞士徕卡公司生产的 HDS3000 型三维激光扫描仪。该型扫描仪测距采用时间漂移原理,最大测距范围 300 m,测速达到 1 800 点/s,最小采样间隔为 1 mm × 1 mm,生成模型表面精度为 ±2 mm,数据处理软件采用 Cyclone6.0,仪器具体参数见表 1<sup>[25]</sup>。

堆积体并进行分析。所选典型滑坡堆积体 WC-25 位于汶川县绵虎镇班子桥村,玉龙电冶厂桥的右岸(图 2a),地理坐标为北纬 31°24′18.05″,东经 103°31′25.96″。堆积体表面为松散土壤颗粒混杂细小碎石,有少量量植被覆盖,坡面有明显侵蚀沟。测量结果见图 2b,测量参数见表 2。

表 1 HDS3000 型三维激光扫描仪基本参数

Tab.1 Parameters of HDS3000 laser scanner

参数	数值
测距范围/m	300(90%反射率)
定位精度/mm	±6(50 m 距离)
距离精度/mm	±4(50 m 距离)
角度精度/(°)	±12(50 m 距离)
扫描视场/(°)	水平 360,垂直 270
数据采样率/(点·s <sup>-1</sup> )	1 800

表 2 典型滑坡堆积体 WC-25 现场扫描参数

Tab.2 Scanning parameters of landslide WC-25

参数	数值
滑坡体前缘到扫描仪的距离/m	58.32
滑坡体后缘到扫描仪的距离/m	136.81
距离扫描仪 200 m 处的扫描间距/cm	20.0 × 20.0
滑坡体前缘的扫描间距/cm	5.8 × 5.8
滑坡体后缘的扫描间距/cm	13.7 × 13.7

在研究区域使用三维激光扫描仪测量典型滑坡

HDS3000 型扫描仪在实际测量环境的测距精度可达到 ±4 mm(50 m 处)<sup>[26]</sup>。扫描仪现场扫描时,滑坡堆积体 WC-25 的扫描间隔范围在 5.8 cm ×

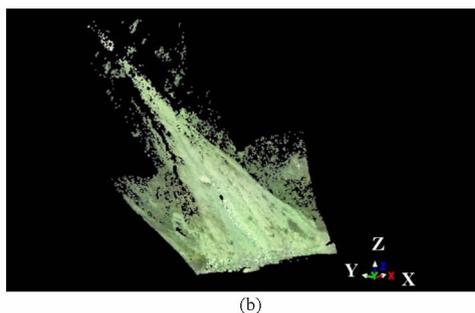


图 2 典型滑坡堆积体 WC-25 的位置及照片

Fig.2 Location and images of typical landslide WC-25

(a) google earth pro 中 WC-25 的鸟瞰图 (b) 滑坡堆积体 WC-25 的三维点云数据

5.8 cm 和 13.7 cm × 13.7 cm 之间(表 2), 侵蚀沟体积计算精度要求为 1 m<sup>3</sup>, 远大于扫描仪的测距精度, 能够满足堆积体坡面侵蚀沟体积测算的精度要求。

## 2 滑坡堆积体坡面侵蚀量计算

### 2.1 原始坡面近似

坡面发生侵蚀前的原始形态已无法实测, 只能依据滑坡堆积体坡面的形态特征, 推断出原始坡面的形态。根据对震区大量滑坡堆积体的实地调查发现, 坡面未发生侵蚀的滑坡堆积体外形与锥体十分接近, 其坡面连续、平整, 近似锥面的一部分。导出滑坡堆积体 WC-25 的点云数据, 用 Surfer Demo 9 软

件拟合, 拟合结果表明, 堆积体坡面未发生侵蚀的区域连续光滑, 近似锥面的一部分(图 3a)。以此为依据, 推断坡面侵蚀沟所在区域在未发生侵蚀前是连续光滑的。对比传统断面法和拟合断面法对原始坡面的设定, 传统断面法设定的原始坡面为平面, 拟合断面法设定的原始坡面为曲面(图 3b), 拟合断面法的设定更加符合震区滑坡堆积体的实际情况。根据 WC-25 滑坡堆积体坡面侵蚀沟的弯折情况, 选取 6 个横截面(图 3c), 将其分为 5 段。选取横截面内堆积体坡面未发生侵蚀区域的实测数据进行曲线拟合, 拟合所得曲线可近似确定为该处坡面侵蚀发生前的原始坡面线(图 3d)。

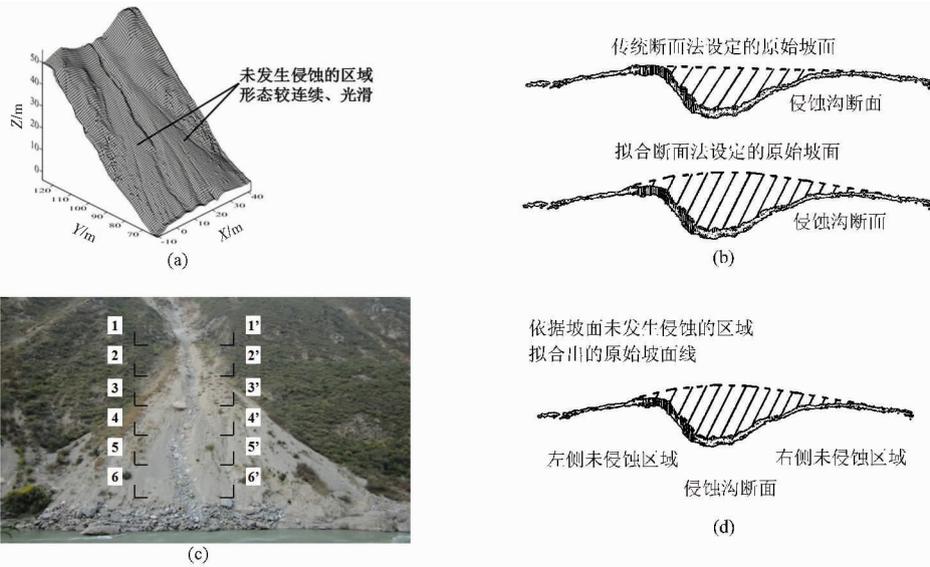


图 3 滑坡堆积体 WC-25 坡面侵蚀沟形态分析

Fig. 3 Morphology analysis of gully for landslide WC-25

(a) 滑坡堆积体 WC-25 的 Surfer Demo 9 拟合结果 (b) 传统断面法与拟合断面法对比  
(c) 堆积体坡面侵蚀沟分段示意图 (d) 原始坡面线确定方法示意图

### 2.2 原始坡面拟合计算

被扫描物体在三维点云空间中的坐标为  $\{(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, m\}$ , 同一横截面内的点云数据的  $y$  坐标相等。设在以  $x$  坐标和  $z$  坐标组成的平面直角坐标系中, 滑坡堆积体坡面横截面的原始坡面线的方程为

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_jx^j + \dots + a_nx^n \quad (1)$$

式中  $a_j$ ——坡面线方程确定系数,  $j = 1, 2, \dots, n$

曲线拟合的方法采取最小二乘多项式拟合, 则原始坡面线的方程必须满足

$$\sum_{i=1}^m (f(x_i) - z_i) = \min \sum_{i=1}^m (f(x_i) - z_i) \quad (2)$$

曲线拟合的目标函数为

$$E = \sum_{i=1}^m (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n - z_i)^2 \quad (3)$$

式(3)对  $a_j$  求偏导, 并令其等于 0, 则有

$$\frac{\partial E}{\partial a_j} = 2 \sum_{i=1}^m x_i^j (a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n - z_i) = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m (a_0x_i^j + a_1x_i^{1+j} + \dots + a_nx_i^{n+j}) = \sum_{i=1}^m x_i^j z_i \quad (5)$$

由式(5)可得方程组

$$\begin{bmatrix} m+1 & \sum_{i=1}^m x_i & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^n \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m z_i \\ \sum_{i=1}^m x_i z_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n z_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中  $x_i, z_i, m$  均已知, 用二次多项式拟合原始坡面线方程,  $n = 2$ 。将  $x_i, z_i, m, n$  代入方程组(6)可求得

多项式确定系数  $a_0, a_1, a_2$ 。

### 2.3 计算结果

以横截面 2-2' 为例拟合滑坡堆积体的原始坡面线,图 4 显示左右两侧点云拟合之后的原始坡面线与实测坡面线符合较好。

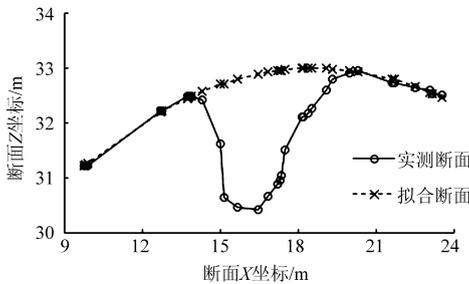


图 4 横截面 2-2' 的拟合与实测结果对比

Fig. 4 Comparison between fitted and measured value for section 2-2' of landslide WC-25

分别计算 6 个横截面的面积和分段侵蚀沟长度,代入断面法体积计算公式

$$V = \sum_{i=1}^l \frac{A_i + A'_i}{2} D_i \quad (7)$$

式中  $V$ ——计算得到的沟道体积,  $m^3$

$A_i$ ——第  $i$  段沟道的上端横截面面积,  $m^2$

$A'_i$ ——第  $i$  段沟道的下端横截面面积,  $m^2$

$D_i$ ——第  $i$  段沟道的长度

$l$ ——侵蚀沟被划分的段数

计算结果见表 3, WC-25 滑坡堆积体的坡面侵蚀量为  $355 m^3$ 。

表 3 滑坡堆积体 WC-25 侵蚀沟体积计算结果

Tab. 3 Calculation values of landslide WC-25's

gully volume			
横截面编号	横截面面积/ $m^2$	分段沟长/ $m$	$V/m^3$
1	4.6	21.1	128
2	7.5	16.5	101
3	4.7	9.1	44
4	4.9	7.9	39
5	5.0	9.6	43
6	3.9		
合计			355

### 2.4 结果验证

采用传统断面法计算坡面侵蚀沟横截面面积,得出堆积体坡面侵蚀沟的体积  $V'$ ,并用  $V'$  对表 3 中的计算结果进行验证。传统断面法计算横截面面积在扫描仪内置软件中进行(图 5)。

2 种方法计算的体积结果如表 4 所示,两者相对误差为

$$e_r = \frac{V - V'}{V'} \times 100\% \quad (8)$$

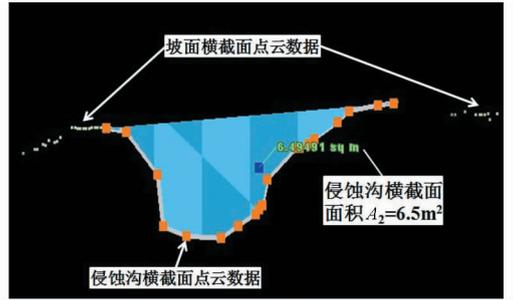


图 5 横截面 2-2' 面积的扫描仪测算结果

Fig. 5 Calculated value of area for section 2-2' by scanner

表 4 滑坡堆积体 WC-25 侵蚀沟体积计算结果对比

Tab. 4 Comparison of landslide WC-25's gully

volume calculation values			
侵蚀沟分段编号	$V/m^3$	$V'/m^3$	$e_r/\%$
1	128	109	17.5
2	101	92	9.9
3	44	40	7.9
4	39	32	23.8
5	43	34	27.1
合计	355	307	15.6

结果表明,原始坡面拟合断面法计算的每条分段沟道体积结果均大于传统断面法计算结果。拟合断面法计算的整条侵蚀沟体积结果与传统断面法测算结果相对误差为 15.6%。5 条分段沟道中最大相对误差为 27.1%,最小相对误差为 7.9%,拟合断面法计算侵蚀沟体积准确度较好。将以  $V'$  为横坐标,  $V$  为纵坐标的点绘入直角坐标系中,各点拟合后的趋势线接近 1:1,决定系数  $R^2$  为 0.9927(图 6),表明拟合法计算侵蚀沟的体积具有较好的精确度。

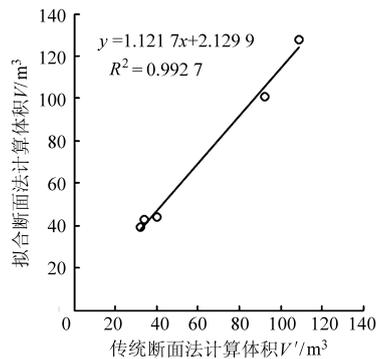


图 6 拟合断面法与传统断面法测算的侵蚀沟体积比较

Fig. 6 Comparison of gully volumes calculated by fitting method and end area method

### 2.5 讨论

断面法原理简单、操作方便,且适合各种测量工具,是测量侵蚀沟体积的最常用方法<sup>[5,8,10]</sup>。但是汶川震区滑坡堆积体的坡面形态有其特殊性,在使用传统断面法测算时需要加以注意。传统的断面法测算时,假定原始坡面为平面。拟合断面法计算时,首

先依据未发生侵蚀的原始坡面,假定原始坡面线的形态,然后进行拟合计算推求原始坡面线。这个过程比传统的断面法更进一步考虑到了原始坡面的真实形态,所以更适合在测算汶川震区滑坡堆积体这种具有一定弧度的坡面时使用。验证结果显示,拟合断面法计算的原始坡面每条分段沟道体积均略大于传统断面法计算结果,这与真实坡面形态是相符的。

拟合断面法也具有局限性。由于原始坡面线经拟合计算得到,侵蚀沟两侧的拟合坡面线与实测坡面线之间存在差异,使得侵蚀沟横截面左、右边界的确定存在误差。在划分坡面点云数据时,由于植被等各种噪声的影响,使得数据划分的结果存在误差。同时,由于人为操作因素、自然环境因素以及仪器自身的因素,三维激光扫描仪在测量时也存在误差。

### 3 结束语

在四川省汶川县选取典型滑坡堆积体,使用三维激光扫描仪实地精细测量,获取了滑坡堆积体形态的数字信息。以滑坡堆积体坡面没有发生明显侵蚀区域的实测数据为基础,采用最小二乘曲线拟合法,计算出堆积体发生侵蚀之前的原始坡面线。再结合坡面侵蚀沟断面的实测数据,采用断面法计算滑坡堆积体坡面侵蚀量。计算得到滑坡堆积体坡面侵蚀量为  $355 \text{ m}^3$ 。使用传统断面法对计算结果进行验证,验证结果表明,拟合断面法计算的每条分段侵蚀沟体积略大于传统断面法计算结果。拟合断面法计算的整条侵蚀沟体积与传统断面法测算结果的相对误差为 15.6%,5 条分段沟道中最大相对误差为 27.1%,最小相对误差为 7.9%。拟合断面法计算侵蚀沟体积的精度较好。

### 参 考 文 献

- Castillo C, Pérez R, James M R, et al. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(4): 1319.
- Daba S, Rieger W, Strauss P. Assessment of gully erosion in eastern Ethiopia using photogrammetric techniques[J]. *CATENA*, 2003, 50(2-4): 273-291.
- El Maaoui M A, Felfoul M S, Boussema M R, et al. Sediment yield from irregularly shaped gullies located on the Fortuna lithologic formation in semi-arid area of Tunisia[J]. *CATENA*, 2012, 93: 97-104.
- Kompani-Zare M, Soufi M, Hamzehzarghani H, et al. The effect of some watershed, soil characteristics and morphometric factors on the relationship between the gully volume and length in Fars Province, Iran[J]. *CATENA*, 2011, 86(3): 150-159.
- Liu Honghu, Zhang Tianyu, Liu Baoyuan, et al. Effects of gully erosion and gully filling on soil depth and crop production in the black soil region, northeast China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 68(6): 1723-1732.
- Capra A, Ferro V, Porto P, et al. Quantifying interrill and ephemeral gully erosion in a small Sicilian basin interrill and ephemeral gully erosion in a small Sicilian basin[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 2012, 56(1): 9-25.
- Casali J, Loizu J, Campo M A, et al. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion[J]. *CATENA*, 2006, 67(2): 128-138.
- Hancock G R, Evans K G. Gully, channel and hillslope erosion-an assessment for a traditionally managed catchment[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(12): 1468-1479.
- di Stefano C, Ferro V. Measurements of rill and gully erosion in Sicily[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(14): 2221-2227.
- Nyssen J, Poesen J, Veyret-Picot M, et al. Assessment of gully erosion rates through interviews and measurements: a case study from northern Ethiopia[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(2): 167-185.
- Giménez R, Marzolf I, Campo M A, et al. Accuracy of high-resolution photogrammetric measurements of gullies with contrasting morphology[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(14): 1915-1926.
- Perroy R L, Bookhagen B, Asner G P, et al. Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California[J]. *Geomorphology*, 2010, 118(3-4): 288-300.
- 游智敏, 伍永秋, 刘宝元. 利用 GPS 进行切沟侵蚀监测研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 91-94.
- Muñoz-Robles C, Reid N, Frazier P, et al. Factors related to gully erosion in woody encroachment in south-eastern Australia[J]. *CATENA*, 2010, 83(2-3): 148-157.
- Martínez-Casasnovas J A. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion[J]. *CATENA*, 2003, 50(2-4): 293-308.
- Desprats J F, Raclot D, Rousseau M, et al. Mapping linear erosion features using high and very high resolution satellite imagery [J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(1): 22-32.
- Schneider A, Gerke H H, Maurer T, et al. Evaluation of remotely-sensed DEMs and modification based on plausibility rules and initial sediment budgets of an artificially-created catchment[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(7): 708-725.
- 霍云云, 吴淑芳, 冯浩, 等. 基于三维激光扫描仪的坡面细沟侵蚀动态过程研究[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(2): 32-37.
- Huo Yunyun, Wu Shufang, Feng Hao, et al. Dynamic process of slope rill erosion based on three-dimensional laser scanner[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(2): 32-37. (in Chinese)

- 19 余叔同,郑粉莉,张鹏. 基于插件技术和 GIS 的坡面土壤侵蚀模拟系统[J]. 地理科学,2010,30(3):441-445.  
Yu Shutong,Zheng Fenli,Zhang Peng. Hillslope soil erosion simulation system based on plug-in technique and GIS[J]. Scientia Geographica Sinica,2010,30(3):441-445. (in Chinese)
- 20 张姣,郑粉莉,温磊磊,等. 利用三维激光扫描技术动态监测沟蚀发育过程的方法研究[J]. 水土保持通报,2011,31(6):89-94.  
Zhang Jiao,Zheng Fenli,Wen Leilei, et al. Methodology of dynamic monitoring gully erosion process using 3D laser scanning technology[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2011,31(6):89-94. (in Chinese)
- 21 严冬春,王一峰,文安邦,等. 紫色土坡耕地细沟发育的形态演变[J]. 山地学报,2011,29(4):469-473.  
Yan Dongchun,Wang Yifeng,Wen Anbang, et al. Configuration evolution of rill development on purple slopedland[J]. Journal of Mountain Science,2011,29(4):469-473. (in Chinese)
- 22 岳鹏,史明昌,杜哲,等. 激光扫描技术在坡耕地土壤侵蚀监测中的应用[J]. 中国水土保持科学,2012,10(3):64-68.  
Yue Peng,Shi Mingchang,Du Zhe, et al. Application of laser scanner in soil erosion monitoring of cultivated slope land[J]. Science of Soil and Water Conservation,2012,10(3):64-68. (in Chinese)
- 23 马玉凤,严平,时莹莹,等. 三维激光扫描仪在土壤侵蚀监测中的应用——以青海省共和盆地威连滩冲沟监测为例[J]. 水土保持通报,2010,30(2):177-179.
- 24 张鹏,郑粉莉,王彬,等. 高精度 GPS,三维激光扫描和测针板三种测量技术监测沟蚀过程的对比研究[J]. 水土保持通报,2008,28(5):11-15,20.  
Zhang Peng,Zheng Fenli,Wang Bin, et al. Comparative study of monitoring gully erosion morphology change process by using high precision GPS,Leica HDS 3000 laser scanner and needle board method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2008,28(5):11-15,20. (in Chinese)
- 25 Leica Geosystems. HDS, Inc. HDS3000 Data Sheet[EB/OL]. [2013-03-03]. <http://hds.leica-geosystems.com/en/5574.htm>.
- 26 刘春,张蕴灵,吴杭彬. 地面三维激光扫描仪的检校与精度评估[J]. 工程勘察,2009(11):57-60,66.  
Liu Chun,Zhang Yunling,Wu Hangbin. Accuracy evaluation of 3D laser range scanner based on field calibration[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2009(11):57-60,66. (in Chinese)

## Estimation of Erosion from Earthquake Landslides in Wenchuan Area

Chen Zhanpeng<sup>1</sup> Lei Tingwu<sup>1</sup> Yan Qinghong<sup>1</sup> Hu Heng<sup>2</sup> Xiong Mingbiao<sup>2</sup> Li Zhenlin<sup>3</sup>

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Sichuan General Monitoring Station of Soil and Water Conservation Ecological Environment, Chengdu 610041, China

3. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** This paper describes a new method for determining the amount of earthquake-added soil erosion in Wenchuan earthquake area. To study on the method, typical landslides were chosen in Wenchuan County, and the information of typical landslide surface and its surrounding terrain were obtained by on-site measurement. The rill/gully on the landslides were identified by image analysis, and the amounts of slope erosion from landslides were estimated by numerical calculation. The on-site measurement was carried out by using a 3-D laser scanner (HDS3000, Leica Company). The scanning distance reached as far as 300 m, with a distance measurement accuracy of  $\pm 4$  mm at 50 m. The scanner was set up in front of the slope of the landslide to be measured. The distances from the scanner to near end and the far end of the landslide were 58.32 m and 136.81 m respectively. The scan grid was set to 20.0 cm horizontal and 20.0 cm vertical at 200 m from the scanner. The actual scan grid of the measured landslide was 5.8 cm  $\times$  5.8 cm at the near end and 13.7 cm  $\times$  13.7 cm at the far end, respectively. Landslides surfaces sections prior to erosion were specified by using least squares curve fitting method, and fitting it with curve of the second degree. The gully volume was estimated by comparing the result of surfaces prior to erosion and on-site data collected with laser scanner. The erosion volume of a typical landslide surface gully from 2008 to 2012 was estimated to be 355 m<sup>3</sup>. The method was verified with the data calculated by traditional cross section area method. The cross sections area and length of gully were calculated by the built-in method of the 3-D laser scanner. The result showed that the values calculated by the method suggested were a little bigger than that by the traditional cross section area method. The relative error of the method was 15.6% for the whole gully, with the lowest being 7.9% and the highest being 27.1% for the segmentations. The reasonable accuracy of the method showed that the rill/gully volume of landslide could be estimated reliably by using it in engineering application.

**Key words:** Earthquake-triggered landslides Slope gully erosion Estimation of gully volume