

基于激光雷达(LiDAR)的地形与钻探滑面重构 滑坡体积计算方法

——以四川省巴塘县德达古滑坡为例

李彩虹^{1,2}, 郭长宝^{2,3*}, 张广泽⁴, 吴瑞安^{2,3}, 张绪教¹, 杨志华^{2,3}, 林之恒⁴, 张怡颖^{2,3}
LI Caihong^{1,2}, GUO Changbao^{2,3*}, ZHANG Guangze⁴, WU Ruian^{2,3}, ZHANG Xujiao¹,
YANG Zhihua^{2,3}, LIN Zhiheng⁴, ZHANG Yiyang^{2,3}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
 3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
 4. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031
1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*
2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
4. *China Railway Eryuan Engineering Group Co.Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China*

摘要: 由于滑坡具有突发性和运动速度快的特性, 对社会和人类生命财产具有重大危害, 往往滑坡体积和规模越大造成的危害也越大, 因此, 滑坡体积的精准计算对于防治工程的实施和防灾减灾风险评价尤为重要。目前滑坡体积计算常用的方法主要有野外测量法、几何法、数值模拟法、DEM(数字高程模型)法等, 这些方法都具有一定的局限性, 对于滑坡体积的计算结果精度较差。因此, 提出了一种基于高精度的激光雷达(LiDAR)地形与滑动面重构的滑坡体积计算方法(LS-Drill_Volume), 并以四川省巴塘县德达古滑坡为例进行滑坡体积的计算研究。通过采用机载LiDAR扫描获取德达古滑坡的地形数据; 利用克里金插值法对滑坡边界点和钻孔数据进行插值, 以此重构滑动面, 获得滑动面高程; 通过填挖方对滑坡体积进行计算, 得到德达古滑坡体积为 $1259 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中德达I号滑坡体积为 $613 \times 10^4 \text{ m}^3$, II号滑坡体积为 $646 \times 10^4 \text{ m}^3$, 与野外测量法相比, 体积计算精度分别提升了20.8%、21.4%和20.2%。此方法与现有体积测算方法相比, 能够提供更精确的滑坡体体积, 从而为滑坡评价及工程防治提供更可靠的依据。

关键词: 滑坡体积; 滑动面; LiDAR; 钻孔; 德达古滑坡

中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2021)12-2015-09

Li C H, Guo C B, Zhang G Z, Wu R A, Zhang X J, Yang Z H, Lin Z H, Zhang Y Y. A landslide volume calculation method based on LiDAR topography and slip surface reconstruction: A case study of Deda ancient landslide in Batang County of Sichuan Province. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2015-2023

Abstract: Because of its suddenly occurrence and rapid movement, the landslide could do great harm to the society and human life. Because the damage caused by landslide increases with the increase of landslide scale, the accurate calculation of landslide volume is

收稿日期: 2021-10-14; 修订日期: 2021-11-05

资助项目: 国家自然科学基金项目《岷江上游大型深层蠕滑型滑坡渐进变形破坏机制与动态稳定性研究》(批准号: 41877279)、《青藏高原东缘古滑坡复活机理与早期识别研究》(批准号: 41731287)和中国地质调查局项目《川西—藏东地区交通廊道活动构造与地质调查》(编号: DD20190319)

作者简介: 李彩虹(1997-), 女, 在读硕士生, 第四纪地质学专业, 从事地质灾害调查与风险评价的研究。E-mail: 1657647609@qq.com

* 通信作者: 郭长宝(1980-), 男, 博士, 研究员, 从事工程地质与地质灾害调查研究。E-mail: guochangbao@163.com

extremely important for the disaster prevention and control projects, and the disaster prevention and mitigation risk evaluation. At present, the commonly used methods for landslide volume calculation mainly include field measurement method, geometric method, numerical simulation method, and DEM method, etc., but there are some certain limitations and poor accuracy of landslide volume calculation results in some of those methods. Therefore, a landslide volume calculation method was proposed, which is based on the high-precision LiDAR terrain and sliding surface reconstruction and named LS-Drill_Volume. The Deda ancient landslide, distributed in Batang County of Sichuan Province, was taken as an example for the LS-Drill_Volume study. The airborne LiDAR scanning method was used to obtain the topographic data of Deda ancient landslide, the landslide boundary points and drill data were interpolated by Kriging interpolation method, and then the sliding surface was reconstructed. Based on the obtained the elevation of the sliding surface, by means of ArcGIS software, the landslide volume was finally calculated by filling and excavation. The calculating results show that the volume of Deda ancient landslide is $1259 \times 10^4 \text{ m}^3$, of which the volume of Deda I landslide section is $613 \times 10^4 \text{ m}^3$, and the volume of landslide II section is $646 \times 10^4 \text{ m}^3$. Compared with the field measurement method, the volume calculation accuracy is improved by 20.8%, 21.4% and 20.2%, respectively. Compared with the existing volume measurement methods, this method can provide more accurate volume of landslide, so as to provide more reliable basis for landslide evaluation and prevention engineering.

Key words: landslide volume; sliding surface; LiDAR; drill; Deda ancient landslide

滑坡作为最常见的地质灾害,对人类的生命财产安全及自然环境造成严重的影响^[1-4]。滑坡发生后形成的堆积体会引起房屋掩埋、道路中断、河流堵塞等危害,并直接影响灾后重建工作的开展^[5-6]。滑坡造成的人员伤亡和经济损失很大程度上取决于滑坡规模,例如1963年,意大利瓦伊昂水库库岸巨型滑坡造成近3000人死亡,经济损失惨重^[7-8];2017年,四川茂县叠溪新磨村发生的大型滑坡摧毁大量的房屋建筑,造成90余人失联^[6,9]。精准获取滑坡体积,根据滑坡规模选择相应的防治措施,能大幅度降低滑坡再次发生造成的损害。因此,滑坡体积的精准计算结果对于防治工程的实施和防灾减灾风险评价尤为重要^[10]。

滑坡体积的计算方法主要有野外测量估算法^[11]、几何法^[12-15]、数值模拟法^[16-17]、DEM(数字高程模型)计算法^[18-20]等。这些方法虽然都能获取滑坡体积,但存在一定不足,如计算工作量大、精度较低等。张小咏等^[5]提出了一种基于遥感影像和DEM的滑坡体积快速计算方法,通过建立虚拟平衡线计算获得滑坡体积,但滑带控制性较差,因此,获得的滑坡体积精度较低。为提高滑坡体积计算精度,本文提出基于激光雷达(LiDAR)的地形钻探重构滑动面方法计算滑坡体积(LS-Drill_Volume),即利用机载LiDAR地形测绘,获取精确的滑坡地形特征,与钻探揭示的滑带进行滑动面重构相结合,计算获得古滑坡体体积。以四川省巴塘县德达古滑坡为例,借助滑坡体上已有的钻孔数据建立工程地质剖面,获取滑带所在的位置,进而建立虚拟钻孔,

利用滑坡边界点和钻孔数据,通过克里金插值法构建滑坡体下部滑动面,计算机载LiDAR获得的滑坡体表面DEM与滑动面之间的体积,即古滑坡体体积。本方法与传统的滑坡体积计算方法相比提高了滑坡体积计算精度,滑坡体积的计算结果将为该区重大工程规划建设 and 地质灾害防治规划提供参考和理论依据。

1 地质背景

1.1 区域地质概况

德达古滑坡位于四川省巴塘县德达乡德达村,巴曲河右岸(图1)。巴塘县地处横断山脉北端,金沙江中游东岸的河谷地带,青藏高原东缘弧形构造带的转折部位,属三江构造区,构造线走向近南北向^[21],其地形随金沙江走向由北西向东南倾斜,并呈北高南低、东高西低之状,沟谷地形坡度一般在 $25^\circ \sim 60^\circ$ 之间,局部地段地形坡度大于 75° 。区内地形切割强烈,地层以古近系—新近系砂板岩、灰岩为主,地质构造复杂,新构造运动强烈,地震活动频繁等^[22-23]。

1.2 德达古滑坡特征

德达古滑坡斜坡地形呈陡—缓—陡折线形,坡度一般为 $20^\circ \sim 45^\circ$,斜坡坡向为 $230^\circ \sim 250^\circ$ 。主要出露地层为上三叠统曲嘎寺组(T_3q^1)砂板岩、灰岩和中—下三叠统上组(T_{1-2}^b)砂岩、千枚状板岩夹泥砂质灰岩。斜坡上部岩性为灰岩,中下部地层岩性为板岩。受巴曲河水侵蚀冲刷,前缘区斜坡坡度较大,局部陡坎发育,发育小型滑塌体;

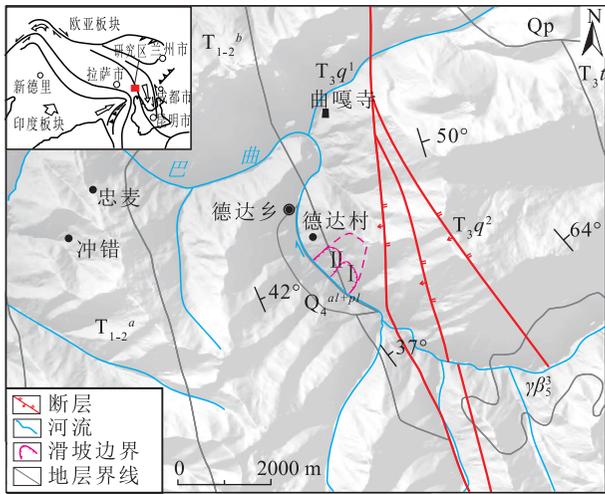


图 1 四川省巴塘县德达滑坡区域位置

Fig. 1 Location of the Deda landslide area in Batang County, Sichuan Province

Q_4^{al+pl} —第四系松散堆积物; T_3t^1 —上三叠统曲图姆组下段砂板岩; T_3q^2 —上三叠统曲嘎寺组上段石英砂岩、灰岩夹基性火山岩; T_3q^1 —上三叠统曲嘎寺组下段砂板岩、灰岩夹基性火山岩; T_{1-2}^b —中下三叠统上组砂岩、千枚状板岩夹泥质灰岩; T_{1-2}^a —中下三叠统下组千枚状板岩夹砂岩、泥沙质灰岩; $\gamma\beta_5^3$ —燕山期晚期斑状黑云母花岗岩

中部发育缓坡平台; 后缘以陡缓交界处为界, 基岩出露。

德达古滑坡平面上以坡体中部冲沟为界划分为 2 个次级滑坡堆积体: 德达 I 号滑体和德达 II 号滑体。德达 I 号滑体纵长为 430~540 m, 横长为 400~580 m, 面积约 $26 \times 10^4 \text{ m}^2$, 推测体积约为 $780 \times 10^4 \text{ m}^3$; 德达 II 号滑体纵长约为 570 m, 横长为 340~540 m, 面积约 $27 \times 10^4 \text{ m}^2$, 推测体积约为 $810 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。德达古滑坡体上共部署了 23 个钻孔, 其中德达 I 号滑体上 14 个钻孔, 德达 II 号滑体上 9 个钻孔 (图 2)。

2 基于 LiDAR 的地表与重构滑动面滑坡体积计算方法

2.1 滑坡体积计算的主要方法

目前滑坡体积的计算方法主要有以下 4 种: ①野外测量法, 主要通过测量滑坡体的纵长和横向宽度, 计算滑坡体表面积, 结合现场物探钻探估算的滑体厚度, 获得滑坡体积^[11]; ②几何法, 将滑坡体划分为不同的地块, 利用相应的体积公式或积分为原

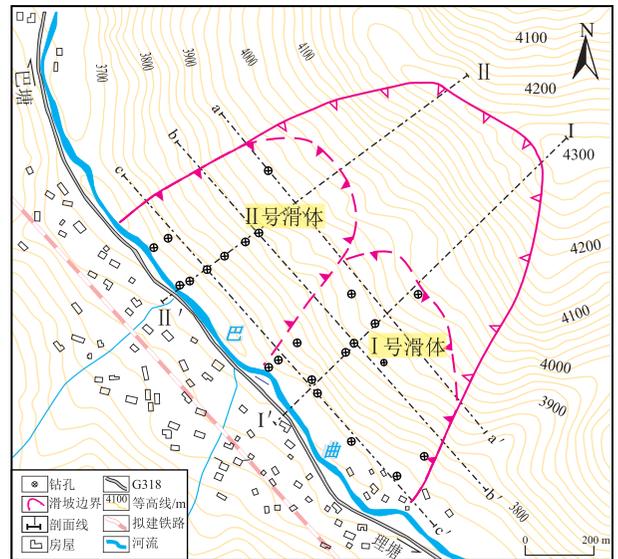


图 2 巴塘县德达滑坡工程平面图

Fig. 2 Geology plane of Deda landslide in Batang County

理进行滑坡体积计算^[12-15]; ③数值模拟法, 结合土力学知识, 对滑坡发生过程进行模拟还原, 利用脚本进行滑坡体积测算^[16-17]; ④DEM 算法, 通过构建滑动前后的滑坡表面模型, 将滑坡滑动前后的 DEM 相减, 计算滑坡体积^[18-20]。

上述方法虽然都能计算滑坡体积, 但存在一定的不足。野外测量法和几何法工作量大且繁琐, 获得的体积精度不高。数值模拟法在还原滑坡发生过程中所需参数在空间和时间上都具有各异性, 还原过程不准确; 而 DEM 算法中由于 DEM 的精度和质量决定着计算的精度, 并且需要滑坡滑动前后两幅 DEM, 不适用于滑坡发生运动前未有遥感影像记录的古滑坡体积计算。

2.2 基于钻探重构滑动面方法

激光雷达 (LiDAR) 技术是现代对地观测的最新技术之一, 通过位置、距离、角度等观测数据直接获取对象表面点三维坐标, 具有探测能力强、分辨率高、能够部分穿透树林遮挡的特性, 是一种直接获取地形表面模型的有效手段^[24]。

为提高滑坡体积计算的精确度, 本文提出一种基于 LiDAR 的地形与钻探滑面重构相结合滑坡体积计算方法, 即 LS-Drill_Volume (Landslide volume calculation based on LiDAR terrain and drilling slip surface reconstruction), 其计算流程如图 3 所示。

①通过 LiDAR 高精度地表模型重建获取滑坡

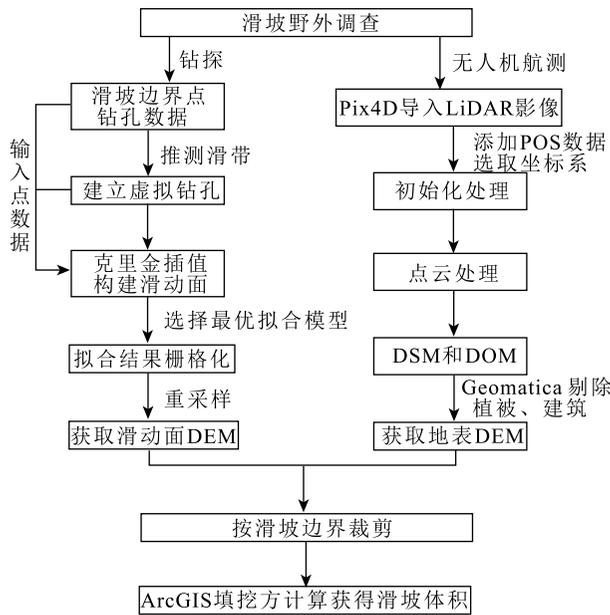


图3 滑坡体积计算技术方法流程

Fig. 3 Flow chart of landslide volume calculation method

表面精确的地形数据 DSM (数字表面模型) 和 DOM (正射影像); ②利用滑坡体上已知的钻孔数据, 绘制滑坡纵向剖面图, 推测滑带的位置, 纵向上建立虚拟钻孔, 推测其在地表与滑动面之间的厚度; ③将钻孔数据网格化, 绘制滑坡横向剖面图, 对比横向上虚拟钻孔在地表与滑动面之间的厚度; ④将获得的滑坡边界点和钻孔数据, 利用克里金插值法重构滑动面 DEM; ⑤滑坡表面与滑动面之间的体积为滑坡体的体积, 通过 ArcGIS 软件平台中的填挖方功能计算获得滑坡体体积。

2.2.1 LiDAR 高精度地表模型重建

将 LiDAR 获取的原始数据及对应的 POS 数据 (包括像片的空间位置和角元素) 添加到 Pix4D 软件中, 选择相应的坐标系, 选取 3D Maps (为应用实例生成 DSM 和正射影像图) 处理模型。处理过程分为 3 个阶段: ①初始化处理, 确定影像处理的路径, 对影像进行快速检测生成质量报告; ②点云和纹理处理, 对生成的点云进行加密、分类和导出, 生成三维网格纹理; ③ DSM 和正射影像处理, 对每张影像对应的 DSM 和正射影像图进行合并瓦片, 得到整个拍摄范围的 DSM 和正射影像图。

通过对原始数据处理, 获得地表地形数据 DSM, DSM 中不仅包括地面点, 还包括非地面物体的三维信息, 如建筑、树木、汽车等。计算滑坡体积所

需要的是仅包含地形高程信息的 DEM (数字高程模型)^[25]。因此, 需要对研究区的房屋建筑、植被等进行剔除, 进而得到 DEM。可以通过 LiDAR360、Terrasolid 等软件进行点云分类, 获取 DEM; 也可以利用遥感图像处理软件 PCI Geomatica 对植被、建筑等进行剔除。本文主要利用 PCI Geomatica 处理得到滑坡表面 DEM。

2.2.2 基于钻孔揭露滑带的滑动面重建

多数滑坡体积的计算都是基于滑坡发生后与滑坡发生前的对比, 本文主要借助滑坡边界和少量滑体上已知深度的点, 即钻孔、虚拟钻孔, 利用插值的方法进行重建滑动面, 获取在滑坡堆积体中不能直接可见的滑动面, 进而计算滑坡体积。

(1) 虚拟钻孔

由于已知钻孔的数量较少且分布不均匀, 因此要增加虚拟钻孔。在收集钻孔数据和野外调查的基础上, 绘制对应的滑坡纵剖面图, 推测其滑带的位置; 为了降低构建滑动面的误差, 以钻孔部署尽可能均匀分布为原则, 在滑坡纵剖面上建立虚拟钻孔; 确定各虚拟钻孔在地表与滑带之间的厚度, 从而计算各虚拟钻孔点在滑动面上的高程; 根据钻孔数据和虚拟钻孔, 在横向上做滑坡剖面图, 实现网格化, 建立更多虚拟钻孔。

(2) 基于克里金插值法生成滑动面

韩建楠^[10]借助滑坡后壁和少量滑体上已知深度的点进行重建滑动面的方法, 计算滑坡体积。本文根据古滑坡体的特殊性, 重建方式是利用边界点和这些已知深度的点拟合成一个具有高程信息的特定曲面, 以此曲面表示滑动面。曲面的构建方法选择克里金插值法, 该方法也称为空间局部插值法, 是以变异函数理论和结构分析为基础, 在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法, 是地统计学的主要内容之一^[26-27]。根据地统计学的统计特征, 运用克里金插值方法进行的插值, 不仅可以得到预测结果, 而且可以得到预测误差, 有利于评估预测结果的不确定性^[28-29]。

通过 ArcGIS 软件平台中地学统计分析 (Geostatistical Analyst) 功能下的克里金插值法, 获取在高程模型中不能直接可见的滑动面。进行滑动面构建时, 当所选模型的标准平均值 (mean standardized) 最接近 0 时, 均方根预测误差 (root mean square) 最小, 平均标准误差 (average standard

error)最接近于均方根预测误差(root mean square),标准均方根预测误差(root mean square standardized)最接近 1 时,证明所选模型是最优的,构建的滑动面准确性最高^[28]。因此,需要计算各点的已知高程与各点插值计算获得的高程之间的误差,并控制各点的误差大小,以保证构建精确的滑动面 DEM 模型。

2.3 体积计算

根据土方填挖方量计算滑坡体积过程,实质就是把滑坡体区划分成多个子区域,每个子区域的滑动面与滑坡表面的差值乘以该子区域的面积,得到该子区域的挖填方量,即该子区域滑坡体的体积^[30]。滑坡体区内所有子区域的挖填方量分别累加,即为滑坡体体积。计算公式为:

$$v = \sum_{i=1}^n A_i(H_i - h_i) \quad (1)$$

式中: A_i 为第 i 个子区域面积; H_i 为第 i 个子区域滑坡表面高程; h_i 为第 i 个子区域滑动面高程; n 为滑坡体子区域数量; i 为当前计算子区域编号; v 为滑坡体体积。

利用 ArcGIS 软件平台中的 3D Analyst 工具集,把滑坡体区域分割成若干面积相等的棱柱体,根据不同的值,模拟出高低错落的实际地形。滑动面与滑坡面相同位置的棱柱体的高程差值乘以棱柱体顶面积,即为该子滑坡体区域的挖填方量,将所有棱柱体的挖填方量分别累加,即可得出整个滑坡体区域的总挖填方量,如图 4 所示。

此方法与方格网法相比较简单,只要保证滑动面和滑坡表面高程分辨率和范围相同,即可保证每个网格的高程数据建立对应关系,避免了传统方格网法因点位必须对应而给实际计算工作带来的误差^[28]。

3 德达古滑坡体积计算结果

3.1 滑坡表面模型重建

本文对机载 LiDAR 获取的影像进行初始化处理、点云分类、合并每张影像对应的 DSM 和正射影像瓦片,生成分辨率为 0.1 m 的 DSM 和正射影像图。

通过野外调查及正射影像的目视解译可知,研究区影响获得真实地表高程信息的因素主要为植被和房屋建筑。而古滑坡体积的计算必须获得真实的地表高程信息,因此,对获得的 DSM(图 5-A)进一步处理,将研究区的房屋建筑、植被等剔除,得到高精度滑坡表面 DEM(图 5-B),为滑坡体积的精准计算提供了地形数据。

3.2 滑坡剖面

滑动面重建所需的虚拟钻孔的部署以所有钻孔点均匀分布为原则,在德达古滑坡纵向上切出 4 条剖面,作出工程地质剖面图,结合钻孔数据获取滑带所在的位置,确定虚拟钻孔点在滑动面上的高程(图 6、图 7);根据钻孔数据和虚拟钻孔做出横向上的 3 条剖面,实现网格化,绘制滑坡剖面图(图 8),从而建立更多虚拟钻孔;对所有钻孔数据和滑坡边界点进行克里金插值运算,从而完成堆积体下的滑动面的构建。

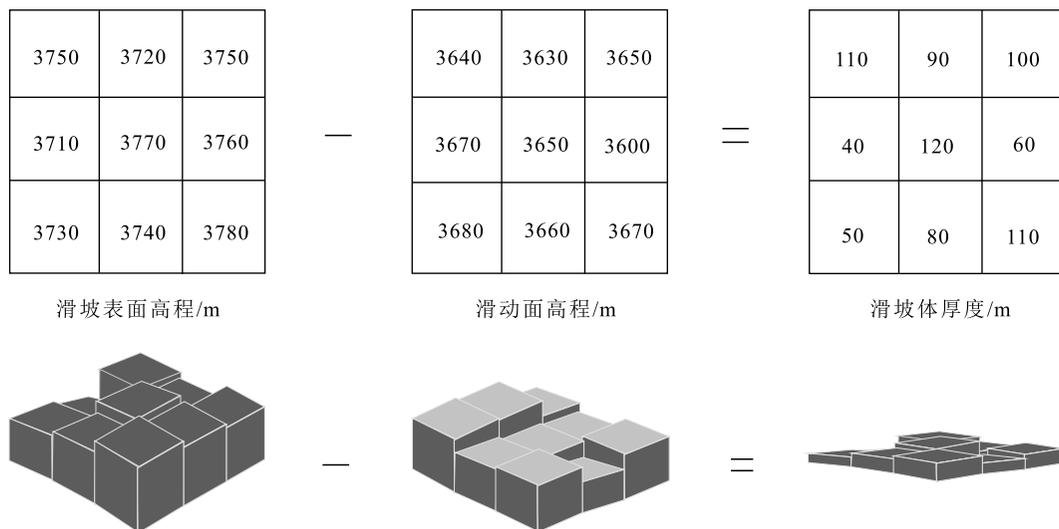


图 4 填挖方体积计算原理(据参考文献[28]修改)

Fig. 4 The calculation principle of fill and excavation volume

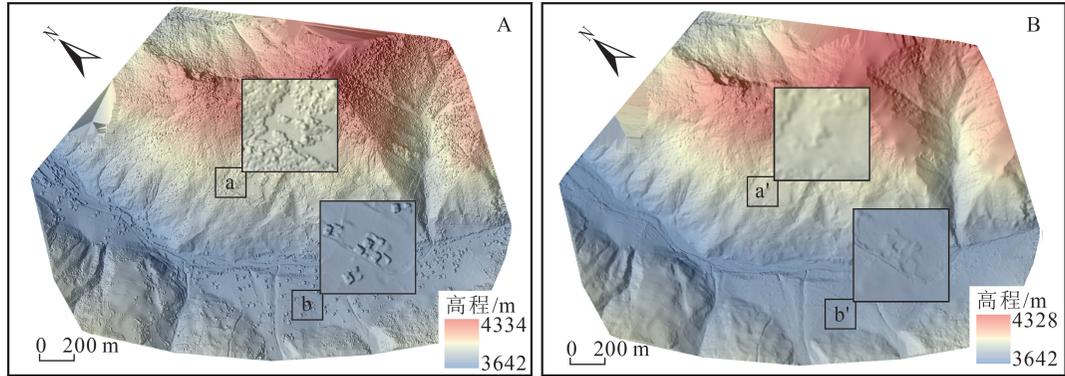


图5 德达古滑坡 DSM(A)与DEM(B)处理效果对比图

Fig. 5 Comparison of DSM(A) and DEM(B) treatment effects of Deda ancient landslide

a—建筑;b—植被;a'—真实地表;b'—真实地表

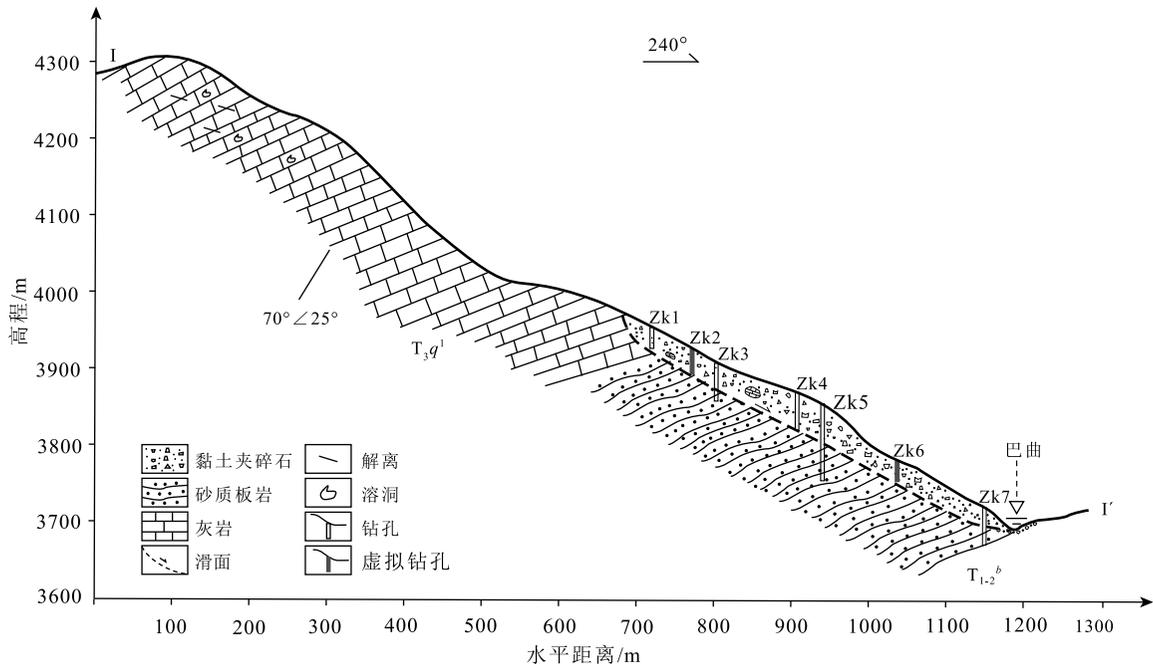


图6 德达古滑坡 I-I' 剖面工程地质图

Fig. 6 Engineering geological profile(I - I') of Deda ancient landslide

T_{3q1}—上三叠统曲嘎寺组下段灰岩;T_{1-2b}—中下三叠统上组千枚状板岩

3.3 滑动面空间形态

进行滑动面构建时,当所选模型的标准平均值(ME)最接近0,均方根预测误差(RMSE)最小,平均标准误差(ASE)最接近均方根预测误差,标准均方根预测误差(RMSSE)最接近1时,证明所选模型是最优的,构建的滑动面准确性最高^[28]。如表1、表2所示,I号滑坡滑动面在趋势效应为一阶时,ME为-0.51,RMSE为18.60,ASE为18.07,RMSSE为1.03,所构建的滑动面效果最佳;II号滑坡在趋势效应为二阶时,ME为0.03,RMSE为13.09,

表1 德达I号滑体滑动面趋势效应

Table 1 Trend effect analysis of the sliding surface of Deda I landslide

趋势效应	标准平均值(ME)	均方根预测误差(RMSE)	平均标准误差(ASE)	标准均方根预测误差(RMSSE)	RMSE-ASE
无	0.60	18.67	23.02	0.83	4.35
一阶	-0.51	18.60	18.07	1.03	0.53
二阶	-0.88	19.50	18.00	1.08	1.50
三阶	-1.22	19.27	16.20	1.19	3.07

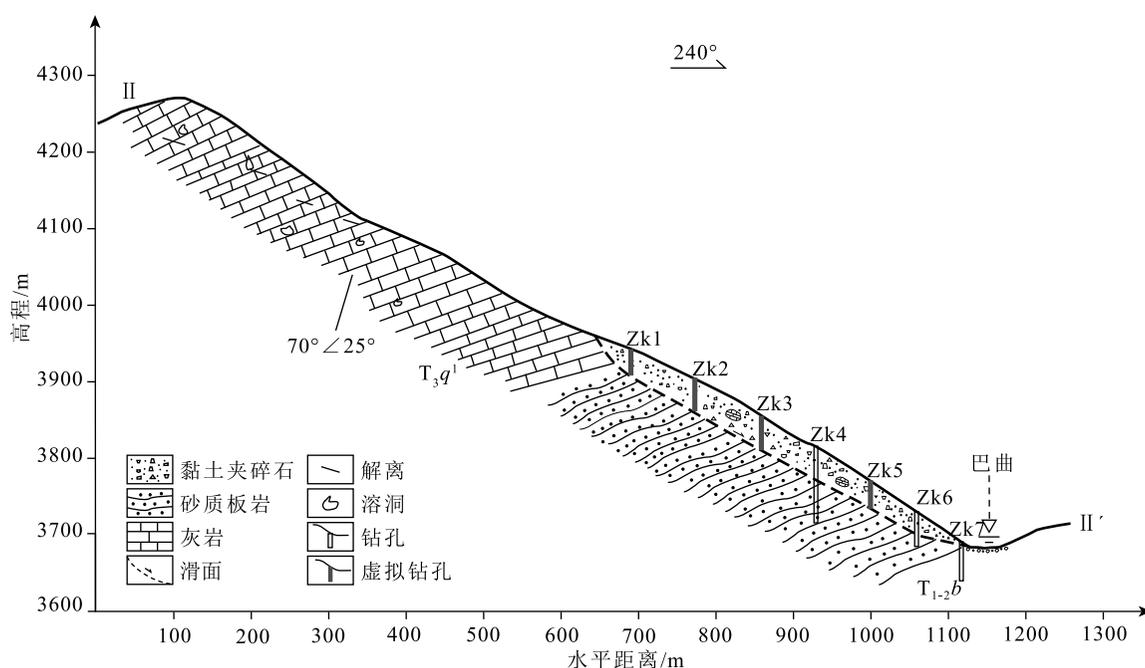


图 7 德达古滑坡 II-II' 剖面工程地质图

Fig. 7 Engineering geological profile(II-II') of Deda ancient landslide

T_{3q^1} —上三叠统曲嘎寺组下段灰岩; T_{1-2}^b —中下三叠统上组千枚状板岩

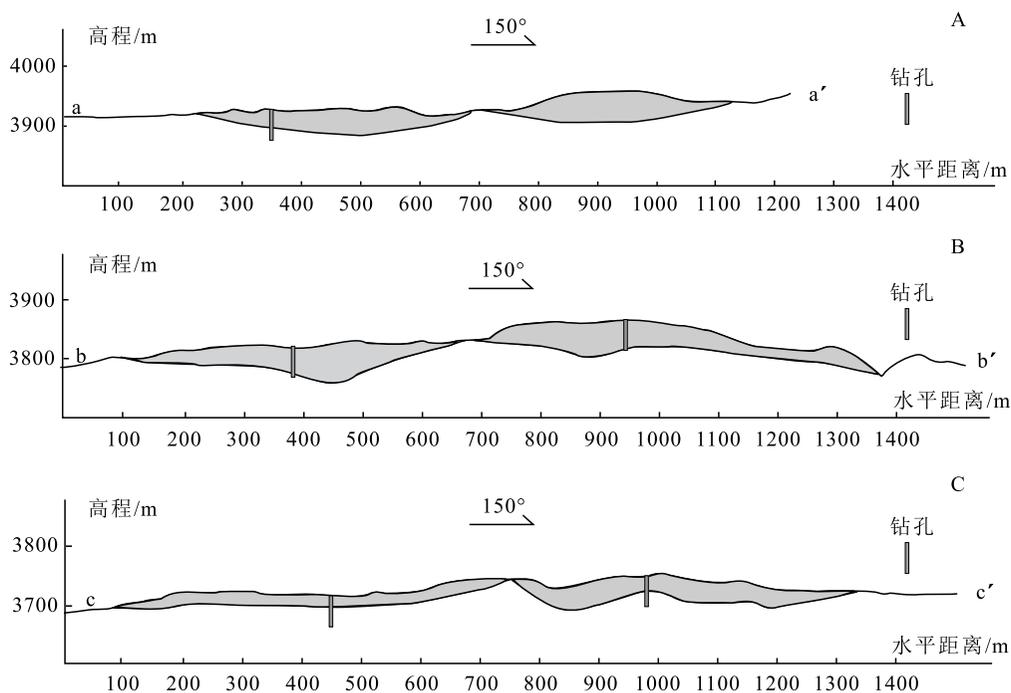


图 8 德达古滑坡横剖面图

Fig. 8 Cross section of Deda ancient landslide

表2 德达II号滑体滑动面趋势效应
Table 2 Trend effect analysis of the sliding surface of Deda II landslide

趋势效应	标准平均值 (ME)	均方根预测误差 (RMSE)	平均标准误差 (ASE)	标准均方根预测误差 (RMSSE)	RMSE-ASE
无	0.33	11.83	7.88	1.58	3.95
一阶	-0.76	12.00	13.17	0.94	1.17
二阶	0.03	13.09	13.18	0.97	0.09
三阶	0.19	13.18	11.40	1.16	1.77

ASE 为 13.18, RMSSE 为 0.97, 所构建的滑动面效果最佳。

利用克里金插值法, 对德达古滑坡体进行滑动面重构。德达 I 号滑体滑动面的点云和德达 II 号滑体滑动面的点云如图 9-A 所示, 其中, 德达 I 号滑体滑动面以平面进行拟合, 德达 II 号滑体滑动面以二次曲面进行拟合, 滑动面拟合结果如图 9-B 所示。

3.4 体积计算结果

将处理完成的滑坡表面 DEM 和通过滑坡边界点、钻孔数据构建得到的滑动面 DEM 导入 ArcGIS 软件平台, 利用 3D Analyst 工具下的填挖方功能, 计算获得德达 I 号滑体的投影面积为 $26.5 \times 10^4 \text{ m}^2$, 体积 $613 \times 10^4 \text{ m}^3$; 德达 II 号滑体体积投影面积 $27.3 \times 10^4 \text{ m}^2$, 体积 $646 \times 10^4 \text{ m}^3$; 滑坡总体积 $1259 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。估算法取得的 2 个滑体厚度均为 30 m, 实际上, 在靠近滑坡边界处的坡体厚度远达不到 30 m, 因此导

表3 德达古滑坡体积计算结果对比
Table 3 Comparison of calculation resultsof the Deda ancient landslide

滑坡体	野外测量估算体积/ 10^4 m^3	LS-Drill_Volume方法计算体积/ 10^4 m^3	建议体积/ 10^4 m^3	基于本文方法的计算精度提升/%
I号滑坡体	780	613	613	21.4
II号滑坡体	810	646	646	20.2
滑坡总体积	1590	1259	1259	20.8

致体积估算结果比实际计算结果偏大。

基于 LS-Drill_Volume 方法计算获得的体积, 比野外测量估算体积获得的结果精度有所提升。I 号滑体野外测量估算获得的体积为 $780 \times 10^4 \text{ m}^3$, 基于 LS-Drill_Volume 方法获得的体积为 $613 \times 10^4 \text{ m}^3$, 精度相对提升 21.4%; II 号滑体野外测量估算获得的体积为 $810 \times 10^4 \text{ m}^3$, 基于 LS-Drill_Volume 方法获得的体积为 $646 \times 10^4 \text{ m}^3$, 精度相对提升 20.2%; 估算法获得的滑坡总体积为 $1590 \times 10^4 \text{ m}^3$, 基于 LS-Drill_Volume 方法获得的滑坡总体积为 $1259 \times 10^4 \text{ m}^3$, 精度相对提升 20.8% (表 3)。

4 结论

(1) 利用机载 LiDAR 地形测绘, 获取精确的滑坡地形数据, 与钻探揭示的滑带进行滑动面重构相结合计算的方法, 可以较精确地获得古滑坡体体积。

(2) 以德达古滑坡为例, 通过 LS-Drill_Volume

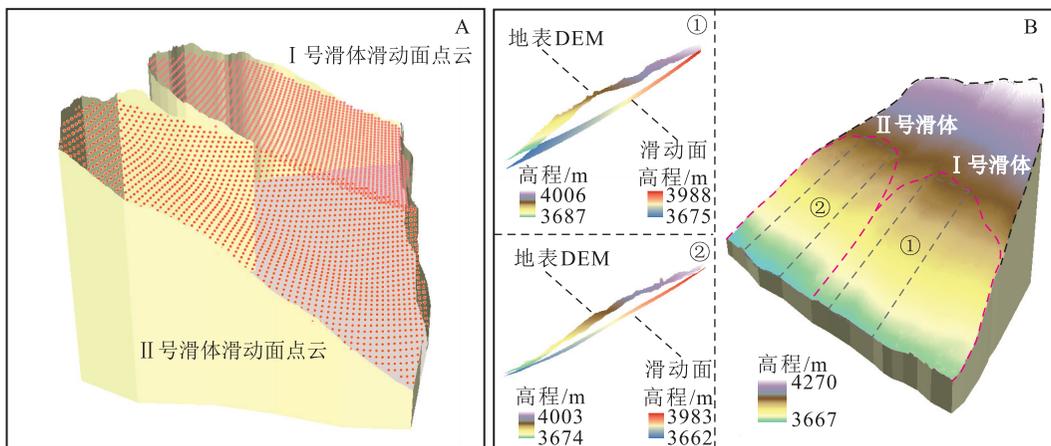


图9 德达古滑坡滑动面拟合结果

Fig. 9 Sliding surface fitting results of the Deda ancient landslide

A—滑动面点云分布图; B—部分滑动面示意图

方法计算获得古滑坡总体积为 $1259 \times 10^4 \text{ m}^3$, 相比估算法精度提升 20.8%。德达 I 号滑体体积为 $613 \times 10^4 \text{ m}^3$, 相比野外测量估算法精度提升 21.4%; 德达 II 号滑体体积为 $646 \times 10^4 \text{ m}^3$, 相比野外估算法精度提升 20.2%。

(3) 本文提出的 LS-Drill_Volume 滑坡体积计算方法相比常规体积计算方法, 精度有较大提高, 可实施性强, 尤其适用滑面被堆积体掩埋的滑坡体积的计算, 为滑坡体积的计算提供了一种新思路, 对滑坡治理及灾后重建具有重要的现实意义。

致谢: 感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见, 中国地质科学院地质力学研究所金继军、宋德光硕士研究生, 四川省地质调查院廖维高级工程师等参加了部分野外地质调查和数据处理工作, 在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-451.
- [2] 王治华. 滑坡遥感调查、监测与评估[J]. 国土资源遥感, 2007, (1): 10-15, 23, 103.
- [3] 郭长宝, 张永双, 蒋良文, 等. 川藏铁路沿线及邻区环境工程地质问题概论[J]. 现代地质, 2017, 31(5): 877-899.
- [4] 孙小平, 曾鹏, 张天龙, 等. 滑坡运动距离超越概率评价及危险性区划[J]. 地质通报, 2021, 40(9): 1560-1569.
- [5] 张小咏, 陈正超, 赵海涛. 一种基于遥感影像和 DEM 的滑坡体体积快速计算方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5): 938-945.
- [6] 许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2612-2628.
- [7] Barla G, Paronuzzi P. The 1963 Vajont Landslide: 50th Anniversary[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(6): 1267-1270.
- [8] 钟立勋. 意大利瓦依昂水库滑坡事件的启示[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, (2): 77-84.
- [9] 赵志明, 潘岳, 陈理. 四川茂县新磨村滑坡高速启动机理研究[J/OL]. 工程地质学报: 1-10[2021-08-19]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-241>.
- [10] 韩建楠. 基于重构滑动面的滑坡体积的测算[D]. 长安大学硕士学位论文, 2018.
- [11] Cha D, Hwang J, Choi B. Landslides detection and volume estimation in Jinbu area of Korea[J]. Forest Science and Technology, 2018, 14(2): 61-65.
- [12] 熊道锬, 胡济珍. 一种计算滑坡体积的新方法[J]. 水文地质工程地质, 1990, (2): 51-54, 50.
- [13] 王湘桂, 吕玲, 王浩. 平行断面法在滑坡体积计算中的应用[J]. 资源环境与工程, 2012, 26: 107-108.
- [14] 周婷, 葛云峰, 郑森, 等. 火星水手谷滑坡体体积的计算方法研究[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(4): 34-42.
- [15] Marchesini I, Cencetti C, Rosa P. A preliminary method for the evaluation of the landslides volume at a regional scale [J]. GeoInformatica, 2009, 13(3): 277-289.
- [16] Murty T S. Tsunami Wave Height Dependence on Landslide Volume[J]. Pure and Applied Geophysics, 2003, 160(10/11): 2147-2153.
- [17] Nikolaeva E, Walter T R, Shirzaei M, et al. Landslide observation and volume estimation in central Georgia based on L-band InSAR[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2014, 14(3): 675-688.
- [18] 王治华, 徐起德, 徐斌. 岩门村滑坡高分辨率遥感调查与机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1810-1818.
- [19] 殷跃平, 成余粮, 王军, 等. 汶川地震触发大光包巨型滑坡遥感研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(5): 674-684.
- [20] Rahman A M, Hiroyuki M. Volumetric Analysis of the Landslide in Abe Berek, Afghanistan Based on Nonlinear Mapping of Stereo Satellite Imagery-Derived DEMs[J]. Remote Sensing, 2021, 13(3): 1-22.
- [21] 曹入文, 周训, 陈柄桦, 等. 四川巴塘县茶洛地区温泉及间歇喷泉水化学特征和成因分析[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 361-372.
- [22] 白永健, 李明辉, 王东辉, 等. 金沙江中游巴塘县地质灾害发育特征及成灾规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 103-109.
- [23] 吴瑞安, 倪嘉伟, 郭长宝等. 川西巴塘断裂带黄草坪滑坡形成机制[J]. 地质通报, 2021, 40(12): 1992-2001.
- [24] 刘妍. 基于 MicroStation 的机载激光雷达数据处理应用研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2011.
- [25] 赵秀臣. 基于无人机低空遥感和深度学习的 DEM 生产技术[D]. 西安电子科技大学硕士学位论文, 2019.
- [26] 吴小芳, 杜清运, 徐智勇, 等. 复杂线状符号的设计及优化算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, (7): 632-635.
- [27] 靳国栋, 刘衍聪, 牛文杰. 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2003(3): 53-57.
- [28] 李俊晓, 李朝奎, 殷智慧. 基于 ArcGIS 的克里金插值方法及其应用[J]. 测绘通报, 2013, (9): 87-90, 97.
- [29] 刘世伟, 吴锦奎, 张文春, 等. 基于克里金插值估算区域降水量的抽样方法对比分析——以甘肃省为例[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 650-657.
- [30] 张建成, 葛亮, 王亮. 利用 ArcGIS 进行土方挖填方量计算的原理与实践[J]. 中国水土保持, 2016, (7): 65-67.