
应
用
技
术

基于无人机影像快速估算矿山排土场边坡土壤侵蚀速率的方法

杨超^{1,2}, 苏正安¹, 马菁³, 苏志满¹, 徐霞², 孔祥周⁴

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 四川师范大学 地理与资源科学学院, 四川 成都 610101; 3. 四川农业大学 水利水电学院, 四川 雅安 625014; 4. 攀枝花市干沟水利水保综合试验场, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: [目的] 探究无人机高清影像快速估算矿山排土场边坡土壤侵蚀速率的方法, 为无长期地形监测地区的土壤侵蚀强度估算提供了新方法。[方法] 通过无人机和 RTK-GPS 分别获取研究区影像及地面控制点坐标, 利用 Agisoft PhotoScan Professional 1.1.2 软件生成研究区空间点云, 利用 ArcGIS 10.3 生成高精度 DEM, 通过目视遥感解译和现场调查, 快速估算研究区土壤侵蚀速率。[结果] 本研究区排土场边坡土壤流失面积 11 052.53 m², 土壤侵蚀总体积 835.41 m³, 土壤侵蚀速率为 4 043.82 t/(km²·a)。使用普通克里金法插值生成 DEM 数据精度为 0.26 m。[结论] 通过本研究方法计算出的排土场土壤侵蚀强度属于中度侵蚀, 土壤侵蚀速率较为符合实际情况, 精度也满足了本研究的需要, 同时, 在高密度点存在的情况下, 各种插值方法生成 DEM 数据误差相差不大, 使用普通克里金法能够使结果最优。

关键词: 无人机; 矿山排土场边坡; 密集点云; DEM; 土壤侵蚀速率

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)06-0126-05

中图分类号: S157.1

文献参数: 杨超, 苏正安, 马菁, 等. 基于无人机影像快速估算矿山排土场边坡土壤侵蚀速率的方法[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 126-130. DOI:10.13961/j.cnki.stbetb.2016.06.021

Method of Soil Erosion Rate Estimation on Mineland Dump Slope Based on Unmanned Aerial Vehicle Image

YANG Chao^{1,2}, SU Zheng'an¹, MA Jing³, SU Zhiman¹, XU Xia², KONG Xiangzhou⁴

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China;
2. College of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610101, China;
3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China; 4. Gangou Soil and Water Conservancy Experimental Station, Panzhihua, Sichuan 617000, China)

Abstract: [Objective] Soil erosion rate of mineland dump slope was estimated using high resolution image of unmanned aerial vehicle(UAV) which provided a new method to estimate the soil erosion rate in the area without long-term topography monitoring. [Methods] The images of study area and spatial coordinates of the ground control points were acquired using UAV and RTK-GPS, respectively. The dense point clouds and high resolution digital elevation models(DEMs) were generated using Agisoft PhotoScan Professional 1.1.2 and Arc GIS 10.3, respectively. Upon which, the soil erosion rate was estimated by visual imagery interpretation and field survey. [Results] The soil erosion area and soil erosion volume in the mineland dump slope were estimated at 11 052.53 m² and 835.41 m³, respectively. The soil erosion rate was estimated at 4 043.82 t/(km²·a). The RMSE of the DEM was 0.26 m using Ordinary Kriging method. [Conclusion] The soil

收稿日期: 2016-02-04

修回日期: 2016-06-08

资助项目: 四川省应用基础研究计划项目“攀枝花矿区弃渣场水土流失机理及植被恢复治理模式研究”(2014JY0067); 国家自然科学基金项目(41401313)

第一作者: 杨超(1992—), 男(汉族), 陕西省商洛市人, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感技术在土壤侵蚀中的应用。E-mail: fqschaози@gmail.com。

通讯作者: 苏正安(1980—), 男(汉族), 四川省江油市人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: suzhengan@imde.ac.cn。

erosion rate of the study area belonged to middle soil erosion, which were thought consisted with factual situations. And hence, the precision of DEM satisfied the request of the study. Although no significant differences in the DEM accuracy could be found among various interpolation methods due to the high density of cloud data, Ordinary Kriging performed best among different interpolation methods.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UVA); mineland waste dump slope; dense cloud data; DEM; soil erosion rate

相比于自然水土流失过程,开发建设项目导致的水土流失是人类生产建设活动过程中扰动地表和地下岩层、堆置废弃物、构筑人工边坡以及排放各种有毒有害物质而造成的水土资源和土地生产力的破坏和损失,是一种典型的人为加速侵蚀^[1]。矿山排土场由采矿区岩土剥离、运输、堆垫而形成,原来的土体和矿层的上覆岩层经过剧烈的扰动混合后,以松散堆积体状态堆置在内外排土场,形成人工巨大松散堆积地貌景观,平台—陡坡是其基本地貌单元^[2],其水土流失分布是点、线、片、带、块、面中的一种或多种形式的组合^[1]。排土场土壤侵蚀过程复杂,主要表现在土壤侵蚀部位集中、类型多样、强度剧烈^[3],容易出现“非均匀沉降”^[4]。相关研究^[5]表明,矿山排土场边坡侵蚀模数为平台的 11 倍。目前,国内外学者多采用模拟降雨试验、冲刷试验、模型模拟和元素示踪^[6]等方法针对矿山排土场水土流失开展了定性和定量方面的研究。近年来,利用无人机快速获取高精度影像,并采用数字高程模型(DEM)快速获取地形数据已成为一种研究热点^[7-10]。相比于传统土壤侵蚀监测方法费时、费力,测量误差具有不确定性,无人机遥感监测技术可以快速获取高精度的地表影像,目前在矿山排土场水土流失监测领域应用较少^[11]。DEM 数据精度是 DEM 模型建立过程中对研究区真实地表情况模拟的正确程度,影响 DEM 精度的主要因素有采样点的密度、分布以及内插方法^[7]。Su 等^[8]采用高精度 DEM 数据,计算了不同坡型耕作侵蚀速率,取得了较好的效果。目前,针对无实测数据地区,如何快速精确计算矿山排土场边坡土壤侵蚀模数尚无可靠的方法。因此,本研究提出了一种通过使用无人机高清遥感影像,获取研究区高程密集点云,生成同一时期较为精确的 2 组 DEM 数据,通过目视解译,提取侵蚀沟体积,以此来计算土壤侵蚀模数的方法。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川攀枝花市盐边县新九乡攀枝花龙麟矿产品有限公司的矿山排土场(101°59′46″E, 26°37′36″N)。攀枝花市地处攀西裂谷中南段,属中

山丘陵、山原峡谷地貌,地势由西北向东南倾斜,山脉走向近于南北,海拔高度在 937~4 195.5 m 之间。气候类型属四川省西南边缘南亚热带干热河谷气候区,具有典型的南亚热带半干旱季风气候特点。区域内年平均气温 19.2 °C,多年平均降雨量为 1 062.9 mm,年蒸发量为 1 936.6 mm,气候干燥。土壤质地多为砂土和壤土,含砂量较多,土壤抗蚀能力较弱^[14],土壤类型主要为红壤和黄红壤。地表水土流失类型主要为水力侵蚀,尤其以面蚀、片蚀、沟蚀等类型为主。研究区内自然植被中乔木有云南松、攀枝花,灌木树种有青枫、山茶树、水红、粗糠叶、水麻等,优势草种主要有白茅、扭黄茅、批碱草、野古草、鹅冠草等。人工植被主要有桑树、桂圆、李子、香椿、桃树、芒果、芭蕉等树种。该矿山排土场占地面积 62.82 hm²,最低堆置标高 1 670 m 水平,最高堆置标高 1 880 m 水平,排土场堆置段高 40 m,分为 4 个阶段排弃(1 760,1 800,1 840,1 880 m),容积 1.22×10⁷ m³,按岩石松散系数 1.46 计算,可堆排 8.33×10⁶ m³ (实方)的废土(石)。

1.2 研究方法

1.2.1 遥感影像及控制点获取 使用的无人机型号为 DJI 大疆精灵 3 Phantom 3 Professional,携带相机镜头像素为 1 200 万,在研究区上空 150 m 左右高度,拍摄清晰无云的照片 21 幅,同时在研究区使用 RTK-GPS(Trimble R8,水平精度 1 cm,垂直精度 2 cm)测得控制点 25 个,作为后期影像配准的控制点。

1.2.2 生成密集点云和正射影像 Agisoft PhotoScan Professional^[15] 1.1.2 是俄罗斯 Agisoft 公司研发的 3D 扫描软件,该软件可以基于航片或高精度数码照片,在有控制点条件下,生成真实坐标的三维模型,同时生成高分辨率正射影像。本研究生成高密度点云和正射影像的流程为:将无人机拍摄的研究区影像导入 Agisoft PhotoScan Professional 1.1.2 中,同时添加 RTK-GPS 测定的控制点,从而生成密集点云。然后生成格网,表面类型为高度场,源数据为密集点云,面数为高,并导出研究区正射影像。

1.2.3 研究区 DEM 生成 通过 Agisoft PhotoScan

获得研究区共计约 300 万个高程点数据,高程点精度为±0.15 m,利用 ArcGIS 10.3 生成高精度 DEM,通过平均误差(ME)和中误差(RMSE)来评价插值精度。

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^* - Z) \quad (1)$$

式中:ME——平均误差(m); n ——样本个数; Z^* ——高程数据的实测值(m); Z ——高程数据的估计值(m)。

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^* - Z)^2 \right]^{0.5} \quad (2)$$

在 DEM 数据生成前,对正射影像进行遥感图像目视解译。矿区坡面侵蚀沟的目视解译主要依靠解译对象在正射影像中的色调、位置、结构特征,结合现场踏勘,进行综合判读提取。本研究区排土场坡度较陡($>25^\circ$),土壤侵蚀类型主要为水蚀。侵蚀沟长度 1~30 m,宽度 0.05~0.3 m,深度 0.02~2 m。侵蚀沟在影像上表现为:呈条形或树枝状结构,色调较深,较大型侵蚀沟有阴影,形成立体,在沟道前缘有土体或石块堆积。基于该特点,对坡面上比较清晰的侵蚀沟道沿沟道边缘进行单条沟道提取,而对体积较小且密集的侵蚀沟采用整体坡面提取法。

通过以上解译标志和解译方法,对整个研究区进行目视解译,获得所有侵蚀沟的解译图斑。本研究区排土场采用梯级堆放,共解译排土场高陡边坡面 4 个,共提取侵蚀沟道 60 条。4 个坡面堆积具体时间有所差异,但主要集中在一年内的旱季堆放,各个边坡形成沟道的时间相差不大。

通过对解译图斑进行缓冲区分析,设置缓冲半径为 0.5 m,生成所有解译图斑的缓冲区。在 ArcGIS 10.3 中分别使用缓冲区图斑和解译图斑筛选位于其中的高程点,得到各个沟道的边缘高程点和全部高程点。然后随机抽样 10% 的高程点作为参考点,比较不同插值方法生成的 DEM 插值精度^[16],优选出最佳插值方法和网格,然后生成 DEM。

1.2.4 侵蚀速率计算 通过普通克里金插值得到研究区 DEM₁ 和 DEM₂ 数据,利用 ArcGIS 10.3 空间分析工具箱中提供的栅格计算器工具,计算提取的侵蚀沟平均深度 DEM₃:

$$DEM_3 = DEM_1 - DEM_2 \quad (3)$$

式中:DEM₃——侵蚀沟数字高程模型;DEM₁——侵蚀前边坡数字高程模型;DEM₂——侵蚀后边坡数字高程模型。

通过统计,得到各沟道平均深度 H_{mean_i} ,然后计算各侵蚀沟侵蚀土壤体积 $V_i(\text{m}^3)$:

$$V_i = S_i \cdot H_{\text{mean}_i} \quad (4)$$

式中: V_i ——各侵蚀沟侵蚀土壤体积(m^3); S_i ——各侵蚀沟面积(m^2); H_{mean_i} ——各侵蚀沟平均深度(m)。

整个研究区的土壤侵蚀总体积为:

$$V_{\text{总}} = V_1 + V_2 + \dots + V_n + \dots + V_i \quad (5)$$

式中: $V_{\text{总}}$ ——侵蚀沟总体积(m^3); V_1 ——第 1 条侵蚀沟体积(m^3); V_2 ——第 2 条侵蚀沟体积(m^3); V_n ——第 n 条侵蚀沟体积(m^3); V_i ——第 i 条侵蚀沟体积(m^3)。

土壤侵蚀模数计算公式为:

$$M_s = \frac{\sum W_s}{F \cdot T} \quad (6)$$

式中: M_s ——侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$; W_s ——年侵蚀总量(t); F ——侵蚀面积(km^2); T ——侵蚀时限(a)。

$$W_s = \tau \cdot V_{\text{总}} \quad (7)$$

式中: W_s ——年侵蚀总量(t); τ ——土体容重 $1.5 \text{ t}/\text{m}^3$; $V_{\text{总}}$ ——侵蚀沟总体积(m^3)。

2 结果和讨论

2.1 DEM 精度比较

采用密集点云数据的 90%(2 785 613 个高程点)生成 DEM,剩余 10%(309 512 个高程点)作为检验数据,分别使用反距离权重法(IDW)、全局多项式法(GPI)、径向基函数法(RBF)、局部多项式法(LPI)、普通克里金法(OK)、简单克里金法(SK)、泛克里金法(UK)、析取克里金法(DK)进行插值研究,通过平均误差(ME)和中误差(RMSE)来评价插值精度。RMSE 并不反映单个误差的大小,而是从整体意义上描述了地形参数和其真实值的离散程度^[17]。从表 1 中可以看出,使用反距离权重法插值中误差为 0.27 m,全局多项式插值中误差为 11.14 m,使用径向基函数(5 种函数)插值法,中误差在 0.30~0.41 m 间变化,局部多项式(两种函数)插值法,中误差基本一致为 0.24 m,使用克里金插值法中误差在 0.26~0.27 m 间变化,插值结果相近。除全局多项式法插值误差较大外,其他插值方法误差均相差不大。使用全局多项式插值中误差较大的原因在于这种插值方法是以整个研究区样点数据为基础,用一个多项式来计算预测值,即用一个平面或者曲面进行全区特征拟合,使用全局多项式法所得的平面很少能与实际的已知样点完全重合,所以其插值所得中误差较大,属于非精确的插值法。总体上克里金插值法插值

误差较小,由于后期要使用较少边缘点进行插值,综合考虑,采用普通克里金法插值最为合适。

表 1 各种插值方法插值精度统计表

方法	ME	RMSE
IDW	6.07×10^{-4}	0.278 6
GPI	4.92×10^{-7}	11.144 8
RBF(规则样条函数)	2.35×10^{-4}	0.305 5
RBF(张力条函数)	1.78×10^{-4}	0.312 2
RBF(高次曲面函数)	1.58×10^{-4}	0.418 1
RBF(反高次曲面样条函数)	1.47×10^{-4}	0.395 1
RBF(平面样条函数)	1.98×10^{-4}	0.312 4
LPI(指数函数)	5.85×10^{-4}	0.243 3
LPI(高斯函数)	4.33×10^{-4}	0.242 3
OK	-1.41×10^{-4}	0.264 5
SK	-9.42×10^{-5}	0.258 5
UK	1.41×10^{-4}	0.264 5
DK	7.00×10^{-3}	0.273 3

注:IDW 为反距离权重法;GPI 为全局多项式法;RBF 为径向基函数法;LPI 为局部多项式法;OK 为普通克里金法;SK 为简单克里金法;UK 为泛克里金法;DK 为析取克里金法。

2.2 侵蚀速率

通过实地调查,本排土场在 2013 年春季完成排土。经计算:研究区坡面 A 侵蚀沟平均侵蚀深度 0.04 m,侵蚀沟总体积 17.53 m³;研究区坡面 B 侵蚀沟平均侵蚀深度 0.06 m,侵蚀沟总体积 415.89 m³;研究区坡面 C 侵蚀沟平均侵蚀深度 0.11 m,侵蚀沟

总体积 336.79 m³;研究区坡面 D 侵蚀沟平均侵蚀深度 0.03 m,侵蚀沟总体积 65.20 m³;研究区总面积 0.08 km²,侵蚀沟总体积 835.41 m³。

由方程(6)–(7)推算出该研究区土壤侵蚀速率为 4 043.82 t/(km²·a),依据水利行业标准《土壤侵蚀分类分级标准》^[18]中水力侵蚀强度分级,该排土场土壤侵蚀强度属于中度侵蚀。

在该排土场采用径流小区法实测的土壤侵蚀模数为 3 250 t/(km²·a),而采用本方法推算得到的土壤侵蚀模数 4 043.82 t/(km²·a)。由此可见,该方法的结果与径流小区实测得到的结果相近,但采用以上 2 种方法求算的土壤侵蚀模数仍然存在一定差异的主要原因是径流小区的布设位置主要是坡度较缓的部位,而采用本研究方法推算土壤侵蚀模数克服了以上缺陷,计算结果更加精确可信。

研究表明,影响排土场土壤侵蚀速率的主要因素除降雨、表面物质组成、植被等一般影响因子外,还有其独有的影响因子,如:排弃方式、堆积时间、防治措施等^[3]。

通过与其他研究中矿山排土场的土壤侵蚀模数进行对比(表 2),本研究区排土场土壤侵蚀模数较小。造成这一现象的主要原因可能是由于本研究区排土场采用梯级堆放,土壤经过压实,从而导致排土场的侵蚀速率显著降低,加之该排土场砾石含量很高,也有利于减小土壤侵蚀速率。

总体上,通过本研究方法计算出的排土场土壤侵蚀速率较为符合实际情况。

表 2 不同条件下矿山排土场土壤侵蚀模数比较

研究区	地形坡度/(°)	植被类型	立地条件	堆积时间/月	土壤侵蚀模数计算方法	土壤侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)
山西省朔州市安太堡露天煤矿 ^[4]	30~40	以人工乔灌草配置为主	母质、母岩、石砾、煤矸石等岩土混合	—	比较法、收集资料、专家访问与现场调查	15 000~30 000
内蒙古锡林郭勒盟胜利矿区 1 号露天煤矿排土场 ^[19]	—	缓坡丘陵非地带性草甸草场类	草甸土为主,构成非地带性土壤,有机质含量 2%~3.68%,pH≈8	12	试验小区法	11 070
云南新平大红山铁矿排土场 ^[20]	31	低矮灌木丛和杂草覆盖	含沙赤红壤	5	侵蚀钉法	7 317

3 结论

(1) 在获取研究区高程点密集点云的情况下,采用各种空间内插方法,得到的 DEM 精度相差不大,使用普通克里金插值法得到的 DEM 数据误差为

0.26 m,满足了本研究的需要。

(2) 通过推算得到矿山排土场场坡面土壤流失面积 11 052.53 m²,侵蚀沟总体积 835.41 m³,土壤侵蚀速率为 4 043.82 t/(km²·a),属于中度侵蚀。

[参 考 文 献]

- [1] 王治国,李文银,蔡继清. 开发建设项目水土保持与传统水土保持比较[J]. 中国水土保持,1998(10):16-17.
- [2] 魏忠义,马锐,白中科,等. 露天矿大型排土场水蚀特征及其植被控制效果研究:以安太堡露天煤矿南排土场为例[J]. 水土保持学报,2004,18(1):164-167.
- [3] 吕钊,王冬梅,徐志友,等. 生产建设项目弃渣(土)场水土流失特征与防治措施[J]. 中国水土保持科学,2013,11(3):118-126.
- [4] 吕春娟. 矿山排土场岩土侵蚀特征及植被恢复的水保效应[D]. 山西太原:山西农业大学,2004.
- [5] 刘瑞顺,王文龙,廖超英,等. 露天煤矿排土场边坡防护措施减水减沙效益分析[J]. 西北林学院学报,2014,29(4):59-64.
- [6] Kimoto A, Nearing M A, Zhang X C, et al. Applicability of rare earth element oxides as a sediment tracer for coarse-textured soils[J]. Catena, 2006,65(3):214-221.
- [7] Ramos M I, Feito F R, Gil A J, et al. A study of spatial variability of soil loss with high resolution DEMs: A case study of a sloping olive grove in southern Spain [J]. Geoderma, 2008,148(148):1-12.
- [8] Müller J, Gärtner R I, Thee P, et al. Accuracy assessment of airborne photogrammetrically derived high-resolution digital elevation models in a high mountain environment[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 98: 58-69.
- [9] School J M, Sonneveld M P W, Veldkamp A. Three-dimensional landscape process modelling: the effect of DEM resolution [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2000,25(9):1025-1034.
- [10] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2014,39(5):505-513.
- [11] 刘青,范建容. 沟蚀监测研究现状及发展展望[J]. 中国水土保持,2012(8):38-41.
- [12] Heritage G L, Milan D J, Large A R G, et al. Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality[J]. Geomorphology, 2009,112(3/4):334-344.
- [13] Su Zhengan, Zhang Jianhui, Qin Fachao, et al. Landform change due to soil redistribution by intense tillage based on high-resolution DEMs [J]. Geomorphology, 2012,175/176(6):190-198.
- [14] 苏正安,陈茜,熊东红,等. 攀枝花矿山排土场土壤侵蚀特征和生态恢复对策[J]. 世界科技研究与发展,2015,37(4):457-460.
- [15] 赵云景,龚绪才,杜文俊,等. PhotoScan Pro 软件在无人机应急航摄中的应用[J]. 国土资源遥感,2015,27(4):179-182.
- [16] 李瑾杨,范建荣,徐京华. 基于点云数据内插 DEM 的精度比较研究[J]. 测绘与空间地理信息,2013,36(1):37-40.
- [17] 汤国安,李发源,刘学军. 数字高程模型教程[M]. 2 版. 北京:科学出版社,2010.
- [18] 水利部水土保持司. SL190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [19] 朱丽,秦富仓. 露天煤矿开采项目水土流失量预测:以内蒙古锡林郭勒盟胜利矿区一号露天煤矿为例[J]. 水土保持通报,2008,28(4):111-115.
- [20] 胡少伟. 云南新平大红山铁矿矿区土壤侵蚀预测及防治规划研究[D]. 云南昆明:昆明理工大学,2004.