

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2021.01-07

# 基于无人机遥测的稀土尾矿土壤侵蚀量估算

李晓放<sup>1</sup>, 廖凯涛<sup>1,2</sup>, 宋月君<sup>1</sup>, 左继超<sup>1</sup>, 罗谦智<sup>3</sup>, 徐雯<sup>4</sup>

(1. 江西省水土保持科学研究院, 江西 南昌 330029; 2. 江西师范大学地理与环境学院, 江西 南昌 330022;  
3. 江西省宜春市袁州区水利局, 江西 宜春 336000; 4. 南昌轨道交通集团有限公司, 江西 南昌 330038)

**摘要:**江西省赣南稀土尾矿极易造成严重的水土流失. 无人机低空航测技术作为一种低空遥测技术为土壤侵蚀强度估算提供了新的监测思路. 本研究借助无人机和全站仪, 在获取稀土尾矿径流小区影像及控制点坐标的基础上, 利用近景摄影测量软件 PhotoScan 以及 ArcGIS 软件, 得到了径流小区不同时间段的侵蚀体积变化, 并对稀土尾矿径流小区的土壤侵蚀量进行了估算. 结果表明: 无人机低空航测生成的 DEM 精度可达 1.24cm; 小区内侵蚀沟数目有 5 条, 小区建成以来的土壤侵蚀体积为 4.63m<sup>3</sup>, 土壤侵蚀量可达 6.34t, 属剧烈侵蚀等级; 侵蚀沟沟型由 U 向 V 型发展; 无人机低空航测技术可较好的用于稀土尾矿的水土流失动态监测和土壤侵蚀模数估算.

**关键词:**无人机; 稀土尾矿; DEM; 土壤侵蚀量

**中图分类号:** S157      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1004-4701(2021)01-0044-06

赣南是我国离子型稀土资源的主要分布区<sup>[1]</sup>, 每年为我国提供大量的稀土矿原材料, 然而与此同时, 形成的大规模稀土尾矿, 对当地的生态环境造成极大的破坏<sup>[2]</sup>. 稀土尾矿土壤常呈酸性, 不利于植物生长, 每到南方雨季, 便会造成严重的水土流失<sup>[3]</sup>. 探清稀土尾矿的水土流失规律和现状是治理稀土尾矿水土流失的重要前提. 石辉等<sup>[4]</sup>通过测定河流淤积泥沙流断面来估算稀土尾矿区的水土流失量, 认为河流中泥沙均来源于稀土尾矿, 没有直接对稀土尾矿进行监测; 卢慧中等<sup>[5]</sup>选择典型的尾矿水土流失区, 采用 GPS 布点的方法对矿堆的主要水土流失类型及其强烈程度进行了研究, 但限于监测点较少, 未能全面有效的反映整个稀土尾矿的侵蚀状况.

无人机低空航测是通过无人机搭载各种传感器获取地面影像或者视频等信息的低空遥感与近景摄影测量系统, 具有及时性、灵活性、全面性优点, 可获取小范围高精度的数据<sup>[6]</sup>. 相关学者已将无人机遥感技术运用

于水土保持监测<sup>[7]</sup>、水土保持信息化<sup>[8]</sup>等领域. 季翔等<sup>[9]</sup>研究表明, 无人机航测技术生成的高精度 DEM 可用于地表侵蚀沟的形态演变过程研究; 杨超等<sup>[10]</sup>采用近景摄影测量技术估算了坡耕地土壤侵蚀速率. 无人机低空航测以及近景摄影测量技术为土壤侵蚀过程监测以及侵蚀量估算提供了一种更为快捷和高效的方法, 有鉴于此, 本研究基于无人机低空航测与近景摄影测量技术, 借助 ArcGIS 的空间分析功能, 开展了稀土尾矿的水土流失动态监测和土壤侵蚀模数估算, 以期为稀土尾矿的水土流失规律研究和防治提供技术支撑与数据参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区介绍

研究区位于江西省九江市德安县的江西水土保持科技生态园境内, 地处 29°16′37″~29°17′40″N, 115°

收稿日期: 2020-12-19

项目来源: 国家自然科学基金项目(41967011); 江西省自然科学基金项目(20181BAB203024);  
江西省水利厅科技项目(202022YBKT20).

作者简介: 李晓放(1985-), 男, 大学本科, 工程师.

42°38′~115°43′06″E。园区海拔高度在 30~100m (85 黄海高程) 之间, 坡度多在 5°~25°, 属于亚热带湿润季风气候, 具有气候温和、雨量充沛、光照充足、四季分明和雨热基本同季等特点。全年无霜期 255d, 多年平均气温 16.8℃, 降雨年内分配不均, 多年平均降雨量 1 470mm。园区位于我国红壤的中心区域, 土壤为发育于第四纪红粘土和泥质岩类风化物的红壤, 坡面土层厚度在 1.5m 左右。

稀土尾矿径流试验小区位于江西水土保持科技生态园的科研试验区内。该稀土尾矿径流试验小区修建于 2012 年, 小区尺寸规格为 10m×5m, 垂直投影面积为 50m<sup>2</sup>, 预设坡比为 1:1, 土壤容重为 1.37±0.07g/cm<sup>3</sup>, 坡度为 31.33°±1.63°。

### 1.2 影像及控制点获取

本研究所用无人机型号为 DJI 大疆精灵 4RTK, 云台相机镜头有效像素为 2 000 万, 航拍垂直高度为距离径流试验小区地表 3m, 共拍摄 120 张高清照片, 相邻照片的前后左右重叠度均在 60% 以上, 拍摄时间分别为 2016 年 11 月 25 日、2017 年 12 月 12 日以及 2018 年 3 月 24 日。为了保证后期土壤侵蚀估算的准确性, 制作了 18 个铁质标识点并用水泥钉将其定位在小区四周的水泥围挡上; 同时在径流小区对面较高位置架设全站仪, 设定相对的平面坐标系, 将全站仪所在点坐标设置为 (0, 0, 0), 使用免棱镜模式, 获取 18 个标识点的中心坐标, 坐标测量使用测回法, 每个控制点测 3 个测回, 最后控制点结果取平均值, 见表 1。

表 1 部分控制点坐标 m

标识点编号	X	Y	Z
2	19.430	33.692	-1.039
4	15.819	36.653	-1.051
5	15.652	36.301	0.278
6	16.491	37.797	2.070
11	21.100	35.350	2.084
15	20.367	34.046	0.597
16	16.379	37.333	0.985

### 1.3 影像数据处理

影像数据处理采用近景摄影测量软件 Agisoft

Photoscan Professional, 无人机航拍影像处理流程主要包括以下步骤: ①加载照片; ②检查照片; ③导入控制点; ④对齐照片; ⑤生成点云; ⑥生成密集点云; ⑦生成网格; ⑧生成纹理; ⑨建立 3D 模型; ⑩生成 DEM 以及生成正射影像。

### 1.4 侵蚀量估算

通过 Agisoft Photoscan Professional 软件处理得到稀土尾矿径流试验小区 3 个不同时期的 DEM 数据, 利用 ArcGIS10.2 空间分析功能下的填挖方工具, 计算出研究区两个时期的体积变化, 并估算土壤侵蚀量, 具体公式如下:

$$W_s = \rho_b \cdot V \quad (1)$$

式中:  $W_s$  为侵蚀总量, t;  $\rho_b$  为土壤容重, g/cm<sup>3</sup>;  $V$  为研究区两个时期的体积变化, m<sup>3</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤侵蚀总量估算

图 1 为研究区三年的密集点云数据和 2016 年的 DEM 数据。从图 1 可以看出, 径流小区自 2012 年建成以来, 经过自然降雨的冲刷, 已形成 5 条明显的侵蚀沟, 其中 1 号和 3 号已经发育至小区上部平台, 宽度和深度巨大; 3 号侵蚀沟的宽度和深度是最大的, 最宽处达 2.36m、最深达 1.24m; 剩余 3 条侵蚀沟 (2、4 和 5 号) 在坡面上, 最大宽度为 0.37m、最大深度为 0.15m; 径流小区上部平台侵蚀较小, 以面蚀为主。将 2016 年径流试验小区的 DEM 与模拟生成的径流小区建成初期的原始 DEM 进行叠加分析, 得到自径流试验小区建成以来的土壤侵蚀体积为 4.63m<sup>3</sup>, 土壤侵蚀量为 6.34t, 年平均侵蚀模数达 3.17×10<sup>4</sup>t/(km<sup>2</sup>·a), 侵蚀等级属剧烈侵蚀。

### 2.2 侵蚀沟形态分析

结合不同坡位处侵蚀沟形态可更好说明不同年份之间的侵蚀规律差异。分别在径流小区集水槽 2m (下坡) 和 4m (中坡) 处取垂直剖面, 分析剖面侵蚀沟形态特征 (见图 2、3)。如图 2 所示, 不同年份的稀土尾矿径流小区上坡处侵蚀沟形态差异不显著, 沟深与沟宽几乎没有变化, 沟深均在 1.72m 左右, 沟宽为 1.03m 左右; 上坡处仅有 2 条侵蚀沟 (1 号和 3 号), 1 号侵蚀沟左侧沟壁上方坍塌并堆积在侵蚀沟内, 3 号侵蚀沟沟型呈现 U 型, 并有向 V 型发展的趋势。图 3 所示, 不

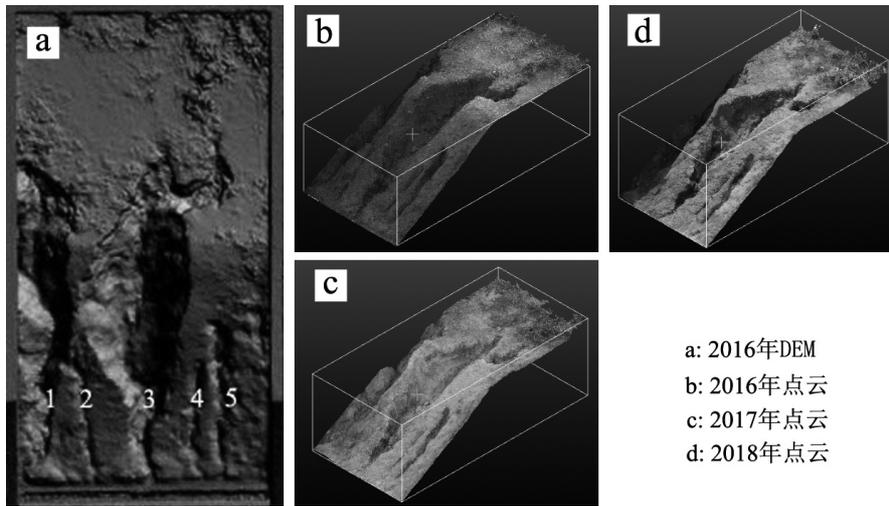


图1 稀土尾矿弃渣试验小区 DEM 及立体点云图

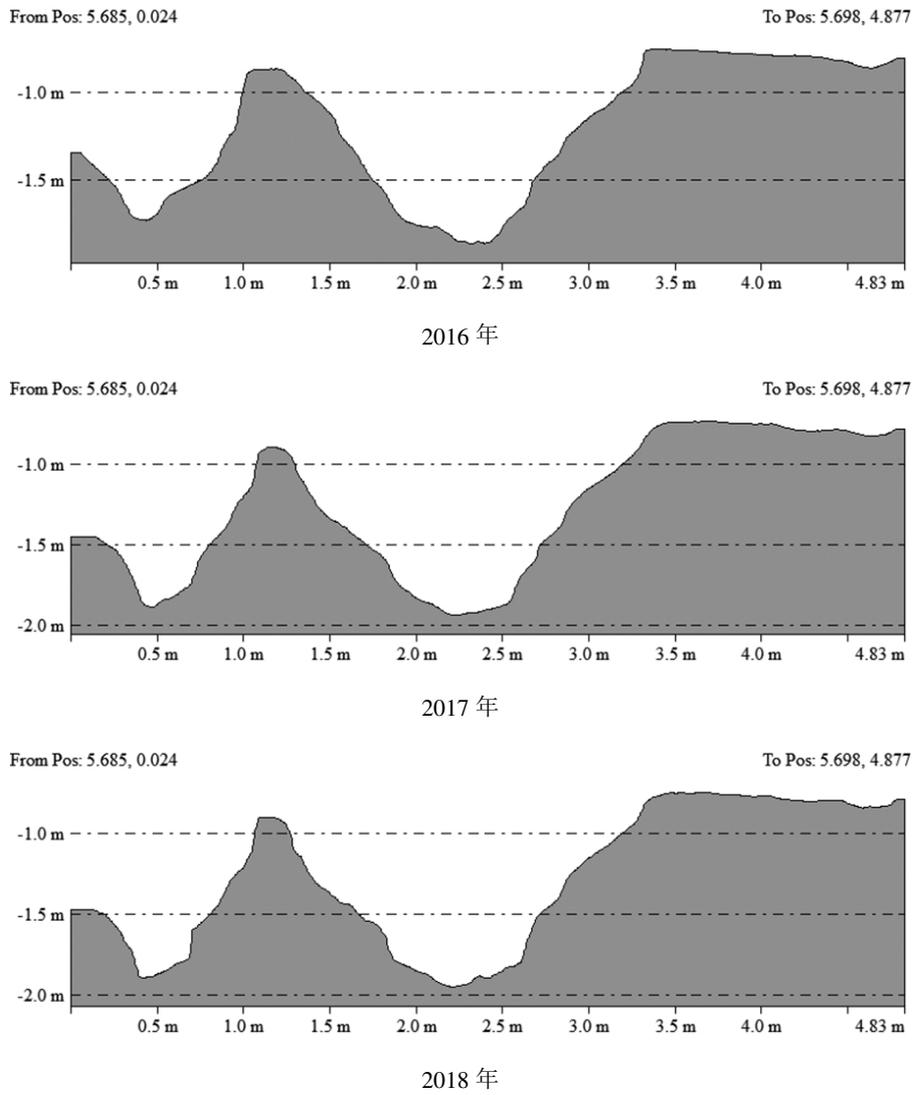


图2 稀土尾矿弃渣小区上坡处坡面沟型图

同年份径流小区中坡处侵蚀沟形态存在差异，沟深和沟壁均发生变化，其中 2016 年 12 月~2017 年 12 月，1 号和 3 号侵蚀沟继续下切，沟深增加分别为 11.24cm 和 6.82cm；1 号侵蚀的沟宽增大，是由于其右侧沟壁坍塌侵蚀所致，平均沟宽增加了 12.67cm；其它 3 条侵蚀沟均存在一定的下切，侵蚀沟沟深有所增加，在

1~2cm 之间。2017 年 12 月~2018 年 3 月，5 条侵蚀沟沟型变化甚微，仅 3 号侵蚀沟有少许由于沟壁坍塌以及沟谷侵蚀等造成的沟型微弱变化；所有侵蚀沟形态均为 V 型。

### 2.3 年度侵蚀量估算

图 4 和图 5 为不同年份稀土尾矿径流小区的微地

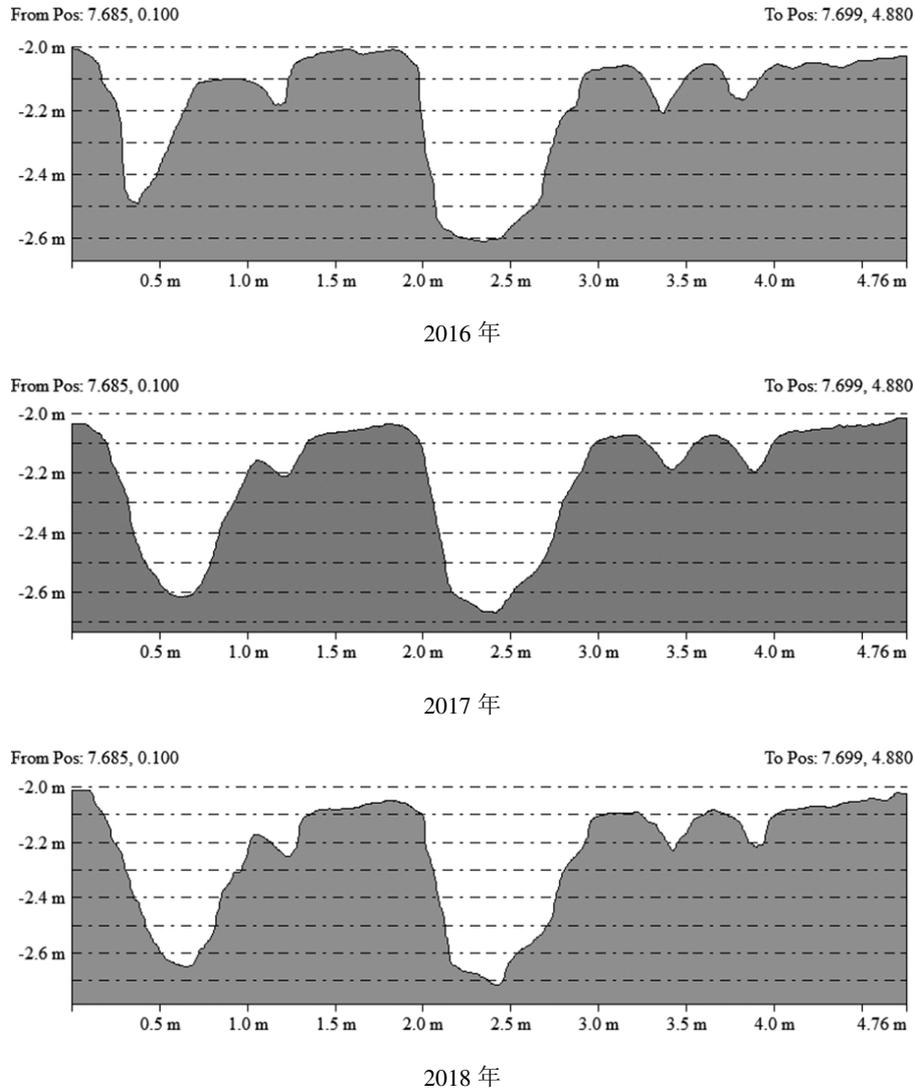


图 3 稀土尾矿弃渣小区中坡处坡面沟型图

貌变化图。2016 年 12 月至 2017 年 12 月(图 4)，径流小区平均侵蚀深度为 1.40cm，最大侵蚀深度为 42.06cm；期间径流小区内侵蚀与堆积并存，通过 ArcGIS 填挖方计算，堆积体积为 0.24m<sup>3</sup>，主要堆积在径流小区下坡处，侵蚀体积为 0.84m<sup>3</sup>，主要集中在原有侵蚀沟壁位置，核减最终侵蚀体积为 0.60m<sup>3</sup>，总侵蚀量为

0.82t。2017 年 12 月至 2018 年 3 月(图 5)，径流小区平均侵蚀深度为 0.50cm，最大侵蚀深度为 24.31cm，期间径流小区内侵蚀与堆积并存，堆积体积为 0.22m<sup>3</sup>，侵蚀体积为 0.44m<sup>3</sup>，侵蚀的主要部位与 2016 年 12 月至 2017 年 12 月略有不同，侵蚀主要为原有侵蚀沟内堆积物的侵蚀，沟壁侵蚀较少，核减最终侵蚀体积为

0.22m<sup>3</sup>,总侵蚀量为0.30t。

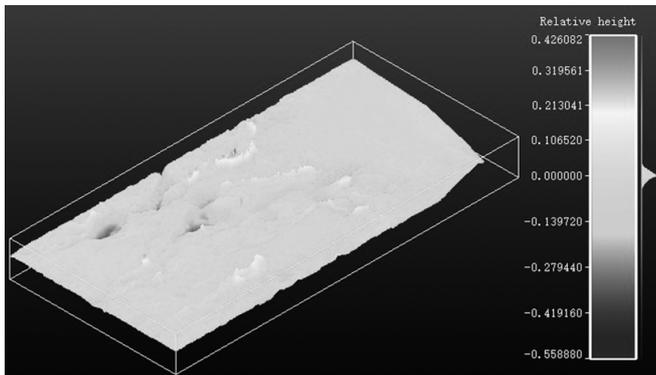


图4 稀土尾矿弃渣小区2016~2017年侵蚀情况

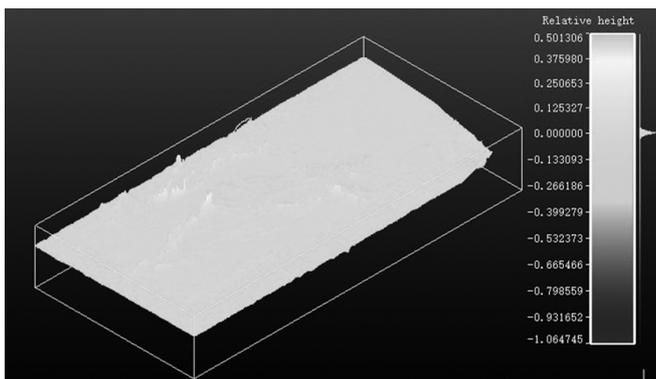


图5 稀土尾矿弃渣小区2017~2018年侵蚀情况

### 3 结论

采用无人机航测和近景摄影测量技术,获取研究区不同时期的高精度点云数据,生成高精度的DEM数据,对不同时期的侵蚀沟剖面以及土壤侵蚀量进行了统计估算分析,结果表明:

(1)稀土尾矿弃渣小区2012年建成至2016年,侵蚀体积数为4.63m<sup>3</sup>,侵蚀量为6.34t,年平均侵蚀模型为 $3.17 \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ,侵蚀强度属于剧烈侵蚀,危害巨大。

(2)稀土尾矿径流小区共发育有5条侵蚀沟,侵蚀

沟最大沟深为1.24m,最大沟宽为2.36m,侵蚀沟发育稳定后,侵蚀多集中在原有侵蚀沟沟壁,侵蚀沟沟型由U向V型发展。

(3)采用无人机低空航测和近景摄影测量技术,结合ArcGIS空间分析,可以生成高精度的DEM数据,开展稀土尾矿的水土流失动态监测和土壤侵蚀模数估算,全面有效的反映整个稀土尾矿侵蚀状况。

#### 参考文献:

- [1] 冯舒悦,文慧,倪世民,等. 南方典型崩岗综合治理模式研究[J]. 中国水土保持,2019(02):18~22.
- [2] 师艳丽,张萌,姚娜,等. 江西定南县离子型稀土尾矿周边水体氮污染状况与分布特征[J]. 环境科学研究,2020,33(01):94~103.
- [3] 郑太辉,汤崇军,黄鹏飞,等. 稻草覆盖对赣南稀土尾渣坡面产流产沙的影响[J]. 环境科学研究,2018,31(09):1564~1571.
- [4] 彭冬水. 赣南稀土矿水土流失特点及防治技术[J]. 亚热带水土保持,2005(03):14~15.
- [5] 石辉,田锋,黄林,等. 红壤区稀土矿开发导致河流泥沙淤积量的估算——以江西省信丰县崇墩沟小流域为例[J]. 水土保持通报,2005(06):53~54+58.
- [6] 卢慧中,梁音,曹龙熹,等. 赣南稀土尾矿堆积区水土流失规律初探[J]. 土壤,2015,47(02):387~393.
- [7] 王志良,付贵增,韦立伟,等. 无人机低空遥感技术在线状工程水土保持监测中的应用探讨——以新建重庆至万州铁路为例[J]. 中国水土保持科学,2015,13(04):109~113.
- [8] 廖凯涛,宋月君,张金生,等. 无人机遥测技术在水土保持生态果园改造监测中的应用[J]. 中国水土保持科学,2017,15(05):135~141.
- [9] 季翔,黄炎和,林金石,等. 崩岗侵蚀沟的时空侵蚀特征及预测[J]. 山地学报,2019,37(01):86~97.
- [10] 杨超,苏正安,熊东红,等. 近景摄影测量技术在坡耕地土壤侵蚀速率研究中的应用[J]. 水土保持学报,2018,32(01):121~127+134.
- [11] 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(06):126~130.

编辑:张绍付

## Estimation of soil erosion on rare earth tailings slope based on UAV Telemetry

LI Xiaofang<sup>1</sup>, LIAO Kaitao<sup>1,2</sup>, SONG Yuejun<sup>1</sup>, ZUO Jichao<sup>1</sup>, LUO Qianzhi<sup>3</sup>, XU Wen<sup>4</sup>

(1. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China;

2. School of Geographic and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang, 330022, China;

3. Yuanzhou District Water Resources Bureau of Yichun City of Jiangxi Province, Yichun 336000, China;

4. Nanchang Rail Transit Group Co.,Ltd, Nanchang 330038, China)

**Abstract:** The tailing of South Jiangxi rare earth mine will cause serious soil erosion. This paper explores the method of rapid estimation of soil erosion by UAV low altitude aerial survey, and provides a new idea for estimating soil erosion intensity of regional rare earth tailings. The runoff plot image and control point coordinates were obtained by UAV and total station respectively, and the high-precision DEM was produced by software Photoscan, and the erosion volume change in different periods of time and the amount of soil erosion in the study area was quickly estimated was obtained by ArcGIS. The results show that the accuracy of DEM generated by UAV low altitude telemetry is 1.24cm; there are 5 erosion gullies in the runoff plot, and the total soil erosion volume is 4.63m<sup>3</sup> and the soil erosion amount is 6.34t, which belongs to severe erosion; after 2016, the erosion gully tends to be stable and the annual erosion is small. UAV telemetry can be used for dynamic monitoring of soil and water loss of rare earth tailings and estimation of soil erosion model.

**Key words:** UAV; Rare earth tailings; DEM; Soil erosion

翻译: 李晓放