

基于近景摄影测量的植物裸露根系三维建模与分析

仇雪连*, 冯娅瑛, 李 娇, 夏 敏, 肖宇童, 韩 珍[#]

贵州大学林学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年3月20日; 录用日期: 2023年4月12日; 发布日期: 2023年4月20日

摘 要

坡面植物根系裸露会影响坡地地表径流流路和土壤侵蚀过程, 然而裸露根系分布特征差异大, 与表层土壤形成不同的空间格局, 制约了裸露根系影响侵蚀特征的进一步研究。因此本研究结合近景摄影测量技术, 借助AgisoftMetashape Professional和ArcGIS软件对裸露根系进行了亚厘米级的高精度三维建模, 用于提取裸露根系的长度、面积和分布方式。结果表明: 1) 在非接触和非破坏的方式下, 近景摄影测量技术能够精准、高效地对野外的裸露根系进行特征提取; 2) 生成的高清晰度影像非常适合亚厘米级以下裸露根系的提取分析; 3) 研究中裸露的纵向根系在长度和面积上均占据主导地位(占比均超过50%), 在进行室内模拟根系裸露对土壤侵蚀的影响过程中, 可以按照纵向、横向和斜向根数量依次递减的顺序布置根系。本研究为进一步研究裸露根系与土壤侵蚀的互馈机制提供了良好理论基础。

关键词

近景摄影测量, 裸露根系, AgisoftMetashape Professional, 侵蚀特征

Three-Dimensional Modeling and Analysis of Exposed Roots Based on Close-Range Photogrammetry

Xuelian Qiu*, Yaying Feng, Jiao Li, Min Xia, Yutong Xiao, Zhen Han[#]

College of Forestry, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Mar. 20th, 2023; accepted: Apr. 12th, 2023; published: Apr. 20th, 2023

*第一作者。

[#]通讯作者。

文章引用: 仇雪连, 冯娅瑛, 李娇, 夏敏, 肖宇童, 韩珍. 基于近景摄影测量的植物裸露根系三维建模与分析[J]. 林业世界, 2023, 12(2): 71-78. DOI: 10.12677/wjf.2023.122009

Abstract

The exposed roots of plants on slope will affect the paths of the surface runoff flow and soil erosion process of slope land. However, the distribution characteristics of exposed roots are quite different, and different spatial patterns are formed with surface soil, which restricts the further study of the influence of exposed roots on erosion characteristics. Therefore, this study combined with close-range photogrammetry, AgisoftMetashape Professional and ArcGIS, sub-centimeter-level high-precision three-dimensional modeling of exposed roots was carried out to extract the length, area and spatial distribution characteristics. The results showed that, 1) In a non-contact and non-destructive way, close-range photogrammetry can accurately and efficiently extract the characteristics of exposed roots in the field; 2) The generated high-resolution images were very suitable for the extraction and analysis of exposed roots below sub-centimeter level; 3) The exposed vertical roots were dominant in length and area (accounting for more than 50%) in this study. In the process of indoor simulation of the effect of exposed roots on soil erosion, the roots could be arranged in the order of decreasing number of vertical, horizontal and oblique roots. This study provides a good theoretical basis for further study of the interaction mechanism between exposed roots and soil erosion.

Keywords

Close-Range Photogrammetry, Exposed Roots, AgisoftMetashape Professional, Erosion Characteristics

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

植被恢复与重建是控制坡面土壤侵蚀的主要途径与措施[1], 植物根系通过交错、穿插、固结、根土粘结等作用促进土壤团聚体的形成和稳定[2]、提高土壤的抗蚀性与抗冲性, 从而抑制土壤侵蚀。经过近些年来大规模的植被恢复, 西南喀斯特区生态恢复效果显著[3], 但是由于该区域生态系统的脆弱性以及人为驱动因素的普遍性, 其水土流失现象依然严重。西南喀斯特区具有土层浅薄、地形破碎、山高坡陡、坡地侵蚀严重等特点[4] [5]。坡地植被根系分布复杂, 随着侵蚀过程的发生, 强烈的径流或泥沙扰动会造成植物根系裸露[6] [7], 甚至是将植物连根拔起[8]。特别是在土层浅薄的喀斯特地区, 侵蚀引起的植物根系裸露现象更为常见。在以往的研究中, 裸露根系常用来估算自然状态下的土壤侵蚀速率[9] [10] [11] [12]。然而裸露根系分布特征差异大, 与表层土壤形成不同的空间格局, 制约了裸露根系影响侵蚀特征的进一步研究。因此准确合理量化研究区坡地植物根系裸露的特征参数, 是阐明根系裸露影响坡地侵蚀过程机制的前提和关键。

2. 方法与步骤

2.1. 标记设置与照片采集

植物裸露根系三维建模利用 AgisoftMetashape Professional (软件版本 1.8.5)软件(以下简称“AMP”软件)完成。AMP 软件是一款独立单机软件产品, 可对数字图像进行摄影测量处理, 并生成 3D 空间数据,

用于地理信息系统(GIS)应用、文化遗产文档、视觉效果制作以及各种规模尺度的物体的间接测量(<https://www.agisoft.com>)。该软件界面简洁易于操作,相比于Pix4Dmapper、Smart3D等图像处理软件具有更好的空中三角形测量效果,并且支持服务器集群设置,无需进行相机校验和控制点布置,即可根据多视图三维重建技术对任意照片处理后产生高质量三维模型,当然也能通过像控点生成真实坐标的三维模型[13]。在进行现场照片采集前,可以在AMP软件菜单栏“工具→标记→打印标记”中打印如图1(a)所示的黑白标记,软件共有12、14、16和20位四种标记形式。将打印的标记均匀放置在被拍摄的植物裸露根系周边,并确保在拍摄过程中标记不会移动,便于后续处理过程中AMP软件自动检测标记,提高建模的精度。

现场照片采集过程中,可以按照上下层和里外层的组合的方式进行拍摄,以充分反应裸露根系的细部结构,减少三维建模过程中的空白。本研究以野外一棵根系裸露的黄葛树(*Ficusvirens Ait. var. sublan-ceolata (Miq) Corner*)为拍摄对象,在根系周边共布置了25个标记,并利用SONY ILCE-6400相机从各个角度拍摄黄葛树的裸露根系得到照片226张,用于后续三维建模。本次现场照片拍摄共计1h,利用笔记本电脑(联想 XiaoxinPro 16ACH 2021,电脑配置:CPU为AMD Ryzen 75800H,内存16.0GB,显卡AMD Radeon™ Graphics)进行三维建模耗时约6h。



Figure 1. AMP software comes with tags (a) and photos of research subjects (b)

图1. AMP软件自带标记(a)及研究对象现场照片(b)

2.2. 三维模型构建

AMP软件三维模型构建主要包括对齐照片及标记、建立密集点云、生成网格及3D纹理等步骤,详见图2。

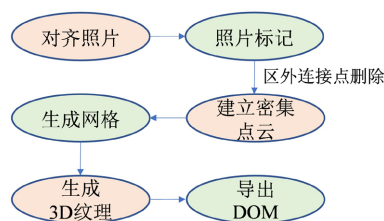


Figure 2. 3D modeling flow chart in AMP

图2. AMP软件三维建模流程图

2.2.1. 对齐照片及标记

将野外采集的照片导入 AMP 软件中,在菜单栏的工作流程中选择添加照片或添加文件夹选项将照片导入软件。随后进行照片对齐,鉴于本研究需反应根系的细部,对齐照片精度选择最高,其余选项为默认。在这一过程中,根据现场布置的标记标定在照片中,并根据标记尺寸建立标尺,以控制测量误差[14]。最终对齐照片后通过菜单栏中的“模型→自由选择”工具手动删除研究区域外的连接点,剩余连接点 197,142 点(表 1 及图 3(a))。

2.2.2. 建立密集点云

点击菜单栏工作流程中的建立密集点云,质量选择高,高级选项中深度过滤为轻度。最终耗时 267 分钟,产生 753,336,291 个点(表 1 及图 3(b))。

2.2.3. 生成网格

打开工作流程中的生成网格选项生成研究区三维网格。数据源可选择连接点、深度图和密集点云三种方式,本研究选择密集点云,这样建立的模型更贴合实际。质量中面数选择高,高级选项中插值部分选择推断,软件能够自动根据照片情况推断空白处的情况,避免生成的三维网格存在漏洞。最终生成的三维网格如图 3(c)所示。

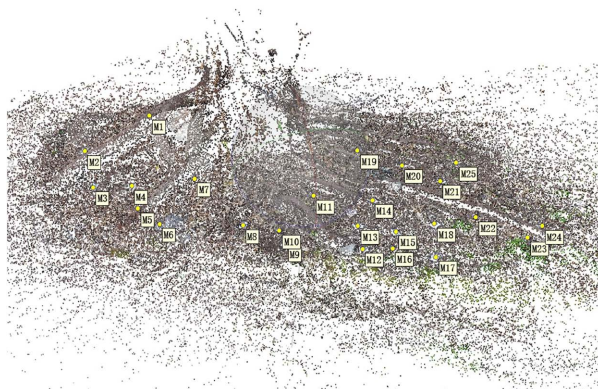
2.2.4. 生成纹理

3D 纹理是利用拍摄照片生成的三维像素矩阵中的点投射到三维物体空间中去,以提高模型的真实性和逼真效果。点击工作流程中的生成纹理选项,材质类型选择纹理映射,数据源来自现场拍摄的照片,映射模式选择保持,混合模式为默认的马赛克,其余选项保持默认。生成的三维模型共计 18,764,076 个面,9,383,597 个顶点(表 1,图 3(c)及图 3(d))。

Table 1. Modeling process and parameter statistics

表 1. 主要建模流程及参数统计表

工作流程	精度	耗时(分)	文件大小(MB)	点数(点)	面数(个)	备注
对齐照片	最高	5	20.41	197,142	-	删除无关点后 连接点个数
建立密集点云	高	267	1003.57	75,336,291	-	
生成网格及纹理	高	63	893.92	9,383,597	18,764,076	点数为顶点数



(a)



(b)

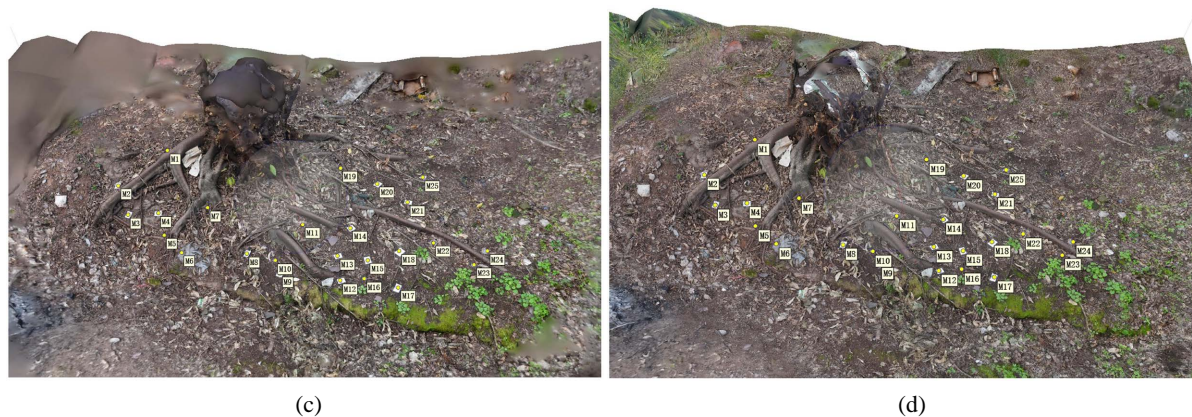


Figure 3. Diagram of 3D modeling workflow of exposed roots (Align photo-generated connection points (a); build dense point clouds (b); generate meshes (c); and generate textures (d); M1~M25 are marked points)

图 3. 植物裸露根系三维建模工作流程结果图(对齐照片生成的连接点(a); 建立密集点云(b); 生成网格(c); 生成纹理(d); 图中标注 M1~M25 为标记点)

2.3. 裸露根系长度及面积提取与分析

在 AMD 软件工作流程中建立 DOM 并导出为.tiff 格式, 用于后续裸露根系长度和面积提取。虽然 AMP 软件自带简单的长度和面积统计功能, 但缺少 ArcGIS 强大的地理分析和统计计算功能, 因此本研究选择 ArcGIS 10.8 进行裸露根系长度和面积的提取。ArcGIS 软件是美国 Esri 公司开发的具有强大的地图制作、空间数据管理、空间分析、空间信息整合、三维建模、发布共享等功能的地理空间分析软件, 目前已广泛应用于解决规划、环境、人口、灾害、建设等诸多领域的重大问题。在 ArcGIS 中, 再次通过 DOM 中的标记进行校准, 以提高后续作业精度。经校准后, 裁剪裸露根系周边无关的区域, 得到像元大小约 0.5 mm、面积约 40 m² 的影像, 根据影像对裸露根系进行勾绘并进行统计分析, 结果详见表 2 及图 4。在研究区范围内共提取根系 43 根, 裸露部分根宽在 0.45~27.08 cm 之间, 差异较大。裸露根系总长度 3266.72 cm, 根系投影面积 17166.00 cm², 根系走向按照与等高线的位置关系总体分为横向、纵向和斜向三种方式。

进一步对裸露根系的分布方式进行统计分析(表 3), 研究发现裸露根系在长度和面积上均表现为纵向 > 横向 > 斜向, 根系长度值分别为 1939.36 (占比 59.37%)、690.67 (占比 21.14%)和 636.69 cm (占比 19.49%)。裸露根系面积按递减顺序排列分别为 8793.07 (占比 51.23%)、6192.09 (占比 36.07%)和 2180.84 cm² (占比 12.70)。研究结果表明纵向根系的占比在长度和面积上均超过 50%, 是主要的根系分布方式。因此, 在进行室内模拟根系裸露对土壤侵蚀的影响过程中, 可以按照纵向、横向和斜向根数量依次递减的顺序布置根系, 进一步探明裸露根系分布与土壤侵蚀的互馈机制。

Table 2. Extraction parameters result of exposed roots

表 2. 裸露根系基本参数提取结果表

裸露根编号	裸露部分根宽(cm)	长度(cm)	面积(cm ²)	裸露根系分布方式
R1	8.85~17.69	204.61	2834.17	横向
R2	4.20~6.34	15.93	79.3	纵向
R3	4.16~16.06	72.41	753.61	纵向
R4	3.06~4.85	29.83	116.87	横向
R5	1.35~1.64	45.32	65.03	斜向

Continued

R6	2.75~4.27	37.39	117.71	斜向
R7	1.49~2.37	62.31	92.22	纵向
R8	12.60~27.08	161.35	2647.52	横向
R9	0.86~1.25	36.94	40.82	斜向
R10	1.80~2.99	88.77	246.07	斜向
R11	0.68~1.76	46.96	64.65	斜向
R12	1.07~1.37	10.00	12.47	斜向
R13	0.45~1.47	13.76	11.21	纵向
R14	1.07~1.67	10.85	15.49	横向
R15	0.95~1.68	44.54	51.79	横向
R16	0.64~1.15	11.67	12.48	斜向
R17	2.71~3.91	31.86	100.69	纵向
R18	3.00~5.48	87.58	321.93	横向
R19	1.64~1.97	54.72	89.98	横向
R20	9.94~21.97	115.75	1424.15	纵向
R21	1.80~2.58	142.12	287.15	纵向
R22	0.89~1.81	35.79	43.54	纵向
R23	1.08~1.22	10.04	12.84	斜向
R24	0.52~0.77	76.11	55.13	斜向
R25	2.44~5.36	39.84	182.22	纵向
R26	3.40~6.55	91.67	562.12	纵向
R27	1.58~10.98	141.30	738.45	纵向
R28	3.38~3.61	26.56	92.93	斜向
R29	0.69~0.85	37.81	28.27	斜向
R30	0.95~1.82	46.03	62.51	纵向
R31	0.77~1.88	77.31	93.9	横向
R32	6.06~7.56	221.95	1495.94	纵向
R33	2.56~4.03	234.95	677.78	纵向
R34	4.78~9.64	49.25	376.22	斜向
R35	2.55~7.24	141.94	638.25	纵向
R36	3.34~6.92	101.77	631.08	斜向
R37	0.69~1.45	19.88	20.44	横向
R38	1.06~3.60	148.71	322.74	纵向
R39	7.45~11.99	79.64	735.98	纵向
R40	0.92~6.13	124.16	264.52	纵向
R41	0.62~0.94	23.41	17.8	纵向

Continued

R42	1.17~3.21	155.83	302.89	纵向
R43	7.05~9.05	58.10	425.14	斜向
合计		3266.72	17166.00	

说明：裸露根系分布方式中“横向”表示根系走向与坡面等高线平行，“纵向”表示与等高线垂直，“斜向”表示与等高线斜交。

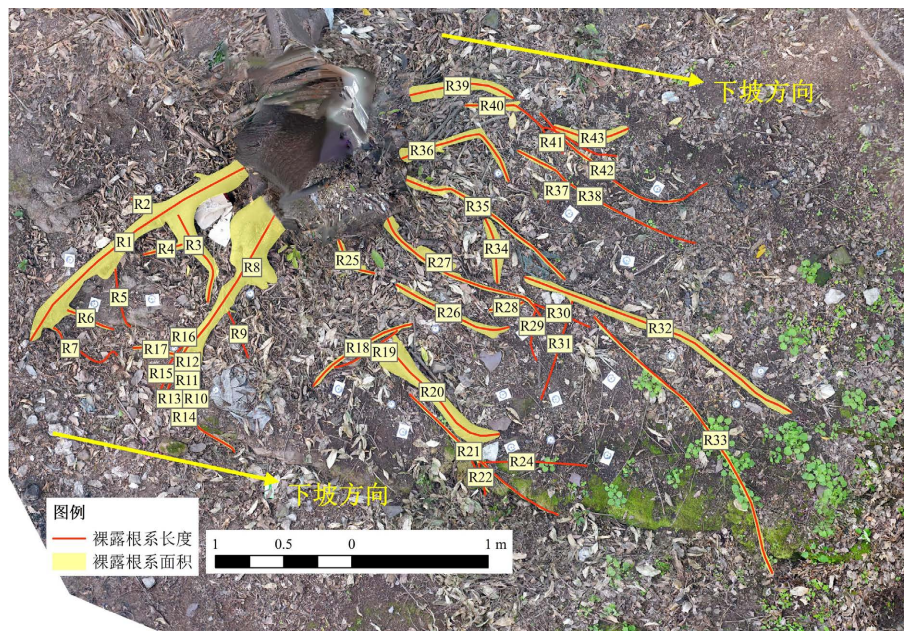


Figure 4. Extraction result of exposed roots
图 4. 裸露根系提取结果图

Table 3. Analysis results of exposed root distribution
表 3. 裸露根系分布分析结果表

裸露根系分布方式	长度		面积	
	长度(cm)	占比(%)	面积(cm ²)	占比(%)
横向	690.67	21.14	6192.09	36.07
纵向	1939.36	59.37	8793.07	51.23
斜向	636.69	19.49	2180.84	12.70
合计	3266.72	100.00	17166.00	100.00

3. 结语

现有研究对于野外裸露根系的调查通常采用皮尺、卷尺等工具对选取的代表性根系进行直接测量，存在费时费力的问题，同时由于裸露根系形状的不规则性，很难量化其裸露面积。鉴于此，本研究利用近景摄影测量技术，利用野外拍摄裸露植物根系照片，通过 AMP 软件进行了三维高精度建模，并将结果导入 ArcGIS 中生成了亚厘米级的影响，并对裸露根系的长度、面积和分布方式进行了统计分析。结果表明，近景摄影测量能够高效地对野外的裸露根系进行特征提取，而不破坏根系；同时生成的高清晰度影

像非常适合裸露根系细节的提取分析,特别是根系尺寸在亚厘米级以下时。裸露根系分布方式的分析结果表明,裸露的纵向根系在长度和面积上均占据主导地位(占比均超过 50%),在进行室内模拟根系裸露对土壤侵蚀的影响过程中,可以按照纵向、横向和斜向根数量依次递减的顺序布置根系。本研究为进一步研究裸露根系与土壤侵蚀的互馈机制提供了良好理论基础。

基金项目

贵州省教育厅高等学校科学研究项目(青年项目)(黔教技[2022]112号);贵州大学 SRT 计划项目(贵大 SRT 字(2022)353号)。

参考文献

- [1] Rey, F., Bifulco, C., Bischetti, G.B., *et al.* (2019) Soil and Water Bioengineering: Practice and Research Needs for Reconciling Natural Hazard Control and Ecological Restoration. *Science of the Total Environment*, **648**, 1210-1218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.217>
- [2] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].水土保持学报,2020,34(3):267-273+298.
- [3] 陈洪松,付智勇,张伟,聂云鹏.西南喀斯特地区水土过程与植被恢复重建[J].自然杂志,2018,40(1):41-46.
- [4] Peng, X.D. and Dai, Q.H. (2022) Drivers of Soil Erosion and Subsurface Loss by Soil Leakage during Karst Rocky Desertification in SW China. *International Soil and Water Conservation Research*, **10**, 217-227. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.10.001>
- [5] 易兴松,戴全厚,严友进,等.西南喀斯特地区耕地撂荒生态环境效应研究进展[J].生态学报,2023,43(3):925-936.
- [6] 杨晨欣,苏常红,李宗善.基于根系年轮的晋西北土壤侵蚀速率研究[J].山西大学学报(自然科学版),2021,44(4):840-847.
- [7] Bodoque, J.M., Lucía, A., Ballesteros, J.A., *et al.* (2011) Measuring Medium-Term Sheet Erosion in Gullies from Trees: A Case Study Using Dendrogeomorphological Analysis of Exposed Pine Roots in Central Iberia. *Geomorphology*, **134**, 417-425. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.016>
- [8] Burylo, M., Rey, F., Roumet, C., *et al.* (2009) Linking Plant Morphological Traits to Uprooting Resistance in Eroded Marly Lands (Southern Alps, France). *Plant Soil*, **324**, 31-42. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9920-5>
- [9] Corona, C., Saez, J.L., Rovéra, G., *et al.* (2011) High Resolution, Quantitative Reconstruction of Erosion Rates Based on Anatomical Changes in Exposed Roots at Draix, Alpes de Haute-Provence-Critical Review of Existing Approaches and Independent Quality Control of Results. *Geomorphology*, **125**, 433-444. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.030>
- [10] Jula, M. and Voiculescu, M. (2022) Assessment of the Mean Erosion Rate Using Dendrogeomorphological Approaches on Exposed Roots along Hiking and Biking Trails in the Bucegi Mountains, Romanian Carpathians. *Catena*, **217**, 106435. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106435>
- [11] Owczarek, P., Dagsson-Waldhauserova, P., Opala-Owczarek, M., *et al.* (2022) Anatomical Changes in Dwarf Shrub Roots Provide Insight into Aeolian Erosion Rates in Northeastern Iceland. *Geoderma*, **428**, 116173. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116173>
- [12] 孙丽萍,王小丹.基于根系解剖结构的金沙江干热河谷土壤侵蚀速率估算[J].地理科学,2012,32(4):492-498.
- [13] 李朋伟,王雁林,徐友宁.基于无人机与 Photscan 软件的矿山地质环境三维立体建模及应用[J].中国矿业,2021,30(9):73-79.
- [14] 邵万里. AgisoftPhotoScan 在立面测量中的应用[J].城市勘测,2019(2):74-76.