引文格式：杨超超,鲁丽. 变化区域三维坐标提取与展示方法研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 113-116. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.11.023

变化区域三维坐标提取与展示方法研究

杨超超[1]，鲁　丽[1]
（1. 安徽省第一测绘院，安徽 合肥 230031）

摘　要：提出了一种整合倾斜摄影三维模型与数字高程模型（DEM）的地表变化监测方法，旨在提升露天矿山开采监管与环境保护的精确性和可操作性。通过比较两期DEM数据的高程差异，并结合二值化和形态学操作技术，精确提取地表变化范围的三维坐标，计算挖填方量和评估采矿合规性，并在三维模型中对结果进行可视化展示。结果表明，该方法自动化程度较高，能高效地对比分析DEM数据，显著提高地表变化监测的精度和效率，三维渲染技术增强了数据的直观性和易读性。该方法还可应用于土地退化、城市扩张和灾害评估等多种地表变化监测任务中。随着技术的发展，将引入更多自动化和智能化元素，为未来的资源管理和环境保护提供更有效的技术支撑。

关键词：倾斜摄影测量；变化区域自动提取；三维渲染展示；露天矿山动态监测
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0113-04

Research on the Extraction and Display Methods of 3D Coordinates for Change Areas

YANG Chaochao[1], LU Li[1]
(1. First Surveying and Mapping Institute of Anhui Province, Hefei 230031, China)

Abstract: In this study, we proposed a surface change monitoring method combining oblique photography 3D model with digital elevation model (DEM), aimed at enhancing the precision and operability of open-pit mining supervision and environmental protection. By comparing the elevation differences between two DEM datasets and combining binarization and morphological operation techniques, we accurately extracted 3D coordinates of surface changes, calculated of cut and fill volumes, assessed mining compliance, and visualized results in 3D model. The key findings demonstrate that this method is highly automated, enabling efficient comparative analysis of DEM data and significantly improving the accuracy and efficiency of surface change monitoring. Additionally, 3D rendering technology can enhance the intuitiveness and readability of data. The method can also be applied to various tasks such as land degradation, urban expansion and disaster assessment. With further technological developments, it is expected that more automated and intelligent elements will be introduced, providing more effective technical support for future resource management and environmental protection.

Key words: oblique photogrammetry, automated extraction of change area, 3D rendering display, dynamic monitoring of open-pit mine

矿产资源是我国社会经济发展的重要物质基础。露天开采因其高回采率、高效率、高度机械化、良好的安全条件和低生产成本等优点而被广泛应用；但这种方式导致了矿区环境的重大变化，且对生态环境造成了一定破坏。因此，快速、准确、实时地监测矿山开采[1]成为解决自然环境问题的重中之重。无人机搭载的高分辨率摄像头，能多角度拍摄地面目标，并通过专业软件处理图片，生成三维模型或高精度地图。无人机倾斜摄影测量能提供比传统航空摄影更详细的视角，成本较低、操作灵活，能快速获取大范围高质量数据，已被广泛应用于地形测绘、城市规划、建筑施工监测等领域。本文将倾斜摄影测量技术作为信息提取和三维模型重建的重要手段。目前基于遥感影像的露天开采区提取方法主要包括人工方法、传统遥感自动提取方法[2]和基于监督分类与DEM的露天开采区边界提取方法[3]。人工方法主观性强且效率低；传统遥感方法则忽略了对象的空间和纹理信息，易产生误分；基于监督分类与DEM的方法则无法获取露天开采区域边界的三维坐标和挖填方量。另外，这些方法均受限于遥感影像的周期性生产，无法随时获取特定区域的有效遥感影像。

本文提出的基于倾斜摄影测量的变化区域三维坐标提取与展示方法，通过无人机倾斜摄影[4]的方式来突破影像更新的周期性限制，可随时或定期对特定区域进行数据获取；通过变化区域自动提取算法，利用DEM高程差来实现变化区域的三维坐标提取、挖填方量计算、超层越界开采量计算[5]。该方法可实现对露天矿山开采动态监测[6]的全流程变化跟踪，形成科

收稿日期：2023-12-22。
第一作者简介：杨超超（1991—），本科，工程师，主要从事测绘地理数据生产以及研发工作，E-mail：1471085716@qq.com。

学、先进、实用、可复制的技术成果，强化矿产资源开采、地质环境保护等日常监督，进一步支撑采矿权的精细化管理。

1 研究区概况

本文选取安徽省芜湖市繁昌区作为研究试点区域，不仅源于其丰富的露天矿产资源，还因其地理位置和行政管理结构具有代表性。繁昌区隶属于安徽省芜湖市，下辖6个建制镇，总面积为584 km^2，形成了一个多元化的地域。区内矿产资源种类繁多，包括金属、非金属、燃料、化工、冶金辅助材料等矿产资源，共有35种已被确认的矿产。繁昌区的矿区涵盖了井下开采和露天开采两种方式，根据调查统计，区内共有118个矿区，井下开采20个，露天开采98个，其中36个矿区正处于露天开采阶段，76个矿山正在进行生态修复。本文以安徽省繁昌县库山矿区水泥石灰岩矿为研究对象，验证变化区域自动提取算法和半自动解译提取对于变化区域范围提取的可行性和准确性，并进一步论证变化区域自动提取算法对于矿区动态监测的有效支撑作用。

2 数据来源与处理

2.1 无人机倾斜摄影数据

无人机数据包括矿区分辨率优于0.1 m的DOM数据、0.1 m格网DEM数据和激光雷达点云数据。无人机倾斜摄影原始照片的中心地面分辨率优于0.05 m，DOM成果地面同名点误差小于0.1 m，三维模型平面中误差小于0.1 m，高程中误差小于0.2 m。

倾斜摄影三维模型生产成果[7]是标准OSGB格式的三维模型数据。为实现三维模型的快速展示，需对原始三维模型数据进行处理，采用OSG2 Cesium App工具或网格大师等软件将OSGB数据转化为Cesium支持的3D Tiles格式。3D Tiles可使建筑物数据集、BIM模型、点云和摄影测量模型等大模型较流畅地在Web端进行浏览展示[8]。

2.2 矢量数据

矢量数据包括矿山开采管理相关专题数据（采矿权范围线等）、矿山专题业务数据、全域道路等重要地物矢量数据，存储格式为Shapefile。为快速方便地加载Shape矢量数据，采用GDAL数据转换工具将Shape转换为GeoJSON格式。

3 研究方法

3.1 变化区域三维坐标自动提取

本文方法通过两期无人机倾斜摄影测量数据的DEM差值判断变化区域并进行边界提取，进而获取变化区域边界的三维坐标和挖填方量；再与采矿权范围、标高进行对比，判断是否存在超层越界开采。本文方法的具体步骤为：①分别读取两期矿山的DEM高程数据，获取图像的尺寸、特定波段和坐标系变换系数[9]；②计算两期影像的高程差值，将高程差绝对值小于设定阈值的像素点视为无显著变化而忽略，其余点则为有效变化点；③将高程差信息转换为二值化图像，进行膨胀与腐蚀[10]，明确变化范围；④提取变化区域边界，定义像元的坐标系并获取高程值形成三维坐标；⑤超层越界区域提取，获取矿山范围的红线数据，将其与变化区域范围进行比较，超出矿山范围红线的变化区域为越界开采部分，变化区域中开采深度大于矿区标高部分则为超层开采；⑥过滤无效数据，去除每个变化区域范围内的重复点、极近点和直线中间点等无效数据，并过滤变化区域面积；⑦对范围线进行平滑处理[11]，抽稀边界点，减少整体点数，生成矢量文件；⑧计算变化范围的正负体积，即挖填方量[12]和范围区域面积，并将结果作为矢量字段值存储；⑨将结果输出为Shape格式的数据文件，并在输出结果后删除临时矢量文件。

3.2 半自动解译变化区域提取

通过ArcGIS平台对两期DEM进行掩膜提取、栅格计算，以实现变化区域边界的半自动高精度提取。半自动解译方法的具体步骤为：①掩膜提取，利用最小包络矩形将两期DEM的变化区域全部包括在内，再按该包络矩形分别对两期DEM进行掩膜提取分析；②栅格相减，利用栅格计算器对提取后的两期DEM进行相减运算，获取高程差值；③二值化，对高程差值进行二值化处理，过滤低于阈值的高程差信息，获得变化区域范围的栅格数据，Con(DEM_Diff>threshold, 1,0)，其中DEM_Diff为差值栅格图层，threshold为选定的阈值，该表达式将所有高于阈值的区域标记为1，其他区域标记为0；④栅格转矢量，将含有高程差值变化区域的栅格转化为矢量；⑤空洞、碎斑处理，填补矢量成果中的空洞面，删除碎斑和细小面；⑥对比判断，若变化区域超出采矿权范围，则为越界开采，若变化区域开采深度低于标高则为超层开采；⑦分析与结论，分析这些变化得出结论。

3.3 变化区域三维渲染展示

展示平台基于Cesium[13]/Mars3D，采用B/S架构模式。为实现浏览器端三维模型的快速浏览，采用Nginx代理发布矿区的3D Tiles模型数据、两期模型变化区域三维坐标以及挖填方量的GeoJSON格式数据[14]，供浏览器端直接调用进行渲染展示。展示平台

系统架构见图 1。不同数据源经过数据预处理，形成倾斜三维模型库、地形三维模型库和矢量数据库等。为实现三维模型的快速展示，需对原始的三维模型数据进行处理，倾斜三维模型库负责将倾斜摄影测量生成的标准 OSGB 数据转化为 Cesium 支持的 3D Tiles 格式；地形三维模型库负责融合全域 DEM 与 DOM 数据；矢量数据库负责将矿区等相关矢量数据 shape 格式转化为 GeoJSON 格式，便于前端浏览器直接加载渲染展示。

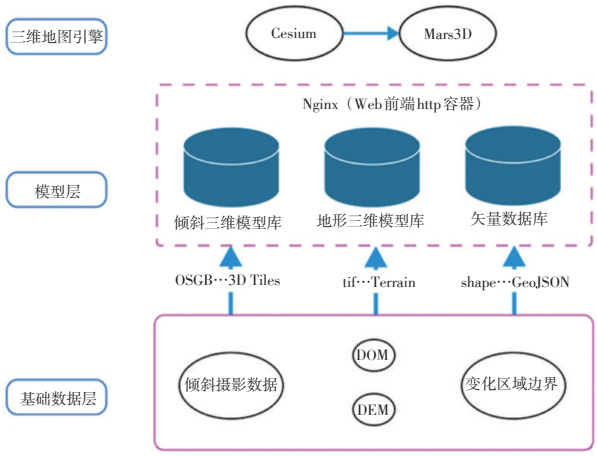
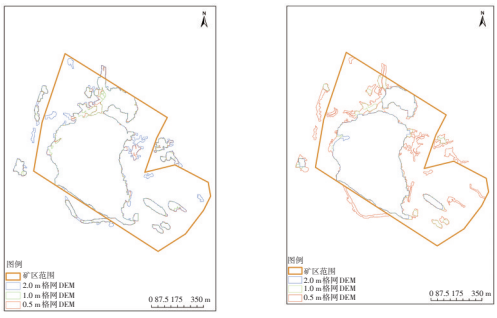


图 1　变化区域三维渲染架构图

4　研究结果分析

4.1　多源数据验证

在相同高程阈值（阈值为变化区域最小高程差值）下，利用变化区域自动提取算法对格网为 0.5 m、1.0 m、2.0 m 的 DEM 数据进行计算，结果表明最终提取变化范围基本一致。将高程阈值分别设置为 1 m 和 2 m，算法提取的变化区域见图 2。



a 高程阈值为 1 m　　b 高程阈值为 2 m

图 2　不同分辨率 DEM 提取结果对比图

4.2　半自动解译提取结果对比

在相同高程阈值下，本文方法与 ArcGIS 平台半自动提取的范围高度一致。利用栅格计算器对掩膜提取后的两期 DEM 进行相减运算，获取高程差值。二值化处理前需要确定一个合适的高程阈值，再对高程差值进行栅格转矢量点，最后进行统计分析。高程差值分布见图 3，当高程差阈值[15]取值位于两个波峰之间时，能明显区分变化区域与非变化区域；取值靠近左边，细小的变化区域将被舍弃，得到明显变化区域；取值靠近右侧，提取的变化区域更准确全面但带有部分细碎微小面。根据多次试验，本文将高程阈值绝对值设定为 6 m，测试矿区变化区域提取得较全面，细小破碎变化区域可舍弃（图 4）。

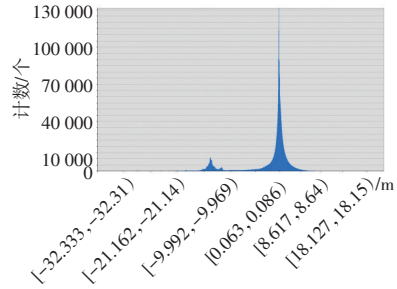


图 3　高程差值统计分布图

4.3　变化区域挖填方量评估

本文方法与 ArcGIS 平台半自动提取对于挖填方量的计算结果误差在可控范围内。选择分辨率为 1.0 m 的 DEM 数据，在 ArcGIS 平台通过 3D Analyst 工具、栅格表面、挖填方工具来计算挖填方量，输出栅格为最终提取的开挖或回填范围的 DEM，以不同颜色标记挖填方区域（图 5）。



图 4　高程阈值为 6 m 时两种方法提取效果对比图

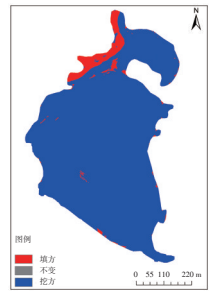


图 5　GIS 平台半自动提取挖填方渲染图

对比本文方法与 GIS 平台半自动解译提取的计算结果可知，挖方量结果差值比为 0.000 9，二者计算结果基本一致，间接验证了本文方法挖方量的精准性；填方量结果差值比为 0.04，二者计算结果差值不大。

4.4　精度评价

本文将变化区域识别任务作为二分类的语义分割问题进行实验研究，将像素点划分为变化点与非变化点。通过目视解译选取两期 10 个变化区域作为样本，本文方法阈值设定后提取变化区域 8 个，未识别区域 2 个，说明提取结果受阈值影响较大。召回率和准确率通常是一对权衡，提高召回率可能导致准确率降低，反之亦然。若对于漏报更敏感，则希望尽量减少未检测出的正例，重视召回率；若对误报更敏感，则

希望尽量减少错误分类的正例，重视准确率。召回率衡量了分类器成功识别正例的能力，即正确预测变化区数量与总变化区数量的比值。准确率衡量了分类器在标识为正例的样本中有多少是真正正例，即正确预测变化区数量与预测的总变化区数量的比值。

本文方法在高程数据发生变化的区域提取准确率很高，地表影像发生变化而高程未变的开采边界区域则有轻微遗漏。另外，在简单的样本测试中，有80%的区域是真正变化的（召回率），同时有80%的识别为变化的区域确实是真正变化的（准确率），表明本文方法的提取效果良好。

4.5 三维效果展示

任选某个矿区在不同时间的两期模型，自动计算期间的挖填方量，并对变化范围和挖填方量进行三维渲染展示，对于超层越界违规开采部分进行红色警示提醒。首先自动输入两个模型对应的DEM数据（tif）、模型数据（3D Tiles）和高程阈值，然后输出两个时相矿区的变化区域三维坐标并放入Nginx中。两个模型按先后顺序在主页面左右分屏显示（图6），系统前端会读取变化区域三维坐标并渲染在左屏幕（前期模型），左屏幕再配合变化区域标记显示，就形成了右屏幕数据（后期模型）。

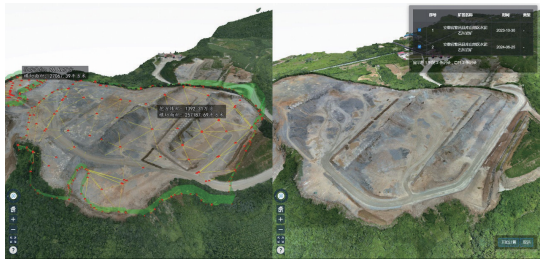


图6 变化范围三维渲染效果图

本文方法的整体运行速度较快，变化范围提取精准，但需注意高程阈值的设置问题，高程阈值应大于两次无人机获取高程差的最小值，排除两次飞行存在的系统误差。该方法理论上适应于众多变化区域提取场景。本文方法提取的结果与ArcGIS平台半自动提取的结果边界差值很小，识别精确度高。该方法能快速分析大量数据，减轻研究人员负担，同时避免了主观因素对结果的影响；且能更全面地捕捉变化区域，提高检测的准确性和可靠性，在变化监测领域具有非常广阔的应用前景。本文方法提取的矿区变化区域侧重于开采过程中高程发生明显变化的区域，对于开采初期地表地貌发生变化，简单的剥离层去除识别不太精确。

5 结 语

本文基于无人机倾斜摄影测量数据，利用DEM逐像元计算得到变化区域平面坐标和三维坐标，并将变化范围在三维模型上渲染展示，从而对繁昌县域矿山开采整体局面进行了有效监管。通过对比本文方法提取结果和ArcGIS平台半自动提取结果验证了本文方法的适用性和准确性。进一步对高程阈值设置进行分析，主要结论为：①高程阈值应大于两期模型高程差值的最小值，阈值越小，变化范围提取越精确，但细碎范围数据冗余，阈值越大，细碎范围过滤效果越好，但变化范围提取和挖填方量值精度会降低；②算法运行兼容性高，自动提取操作简单高效；③本文方法针对性强，通过定期对特定矿区进行数据获取，进而对矿区的开采进度、是否存在越界开采等情况进行有效的动态监测；④本文方法可对矿区变化区域进行三维展示，能直观展示矿区开采进程随时间的变化情况。

参考文献

[1] 曲俊利,孟刚,苗琦. 我国矿山储量动态管理现状、问题及建议[J]. 中国煤炭地质,2022,34(12):46-49

[2] 王跃军. 基于面向对象遥感影像解译方法研究及变化区域的自动检测[J]. 经纬天地,2014(5):82-86

[3] 包勤跃,汪宏,赵守恒,等. 一种基于监督分类和DEM的露天开采区边界提取方法:CN202010995020.2[P].

[4] 韦小儒. 无人机倾斜摄影测量在露天矿山监测中的应用研究[J]. 世界有色金属,2018(7):21-22

[5] 吴昊. RTK测量技术在采矿权勘测定界和超层越界开采动态监测中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济,2023(16):127-129

[6] 段涛,邓宇峰,郭猛猛,等. 无人机低空遥感技术在崩塌地质灾害动态监测中的应用[J]. 能源技术与管理,2024,49(3):31-34

[7] 冯思伟,颜军,刘璐铭,等. 无人机倾斜摄影精细化模型构建及应用[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(6):48-50

[8] 甘麟露,刘天漪. 面向Web的大规模数字表面模型可视化策略研究[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(6):113-116

[9] 刘少毅,钟海云,张卫柱,等. 数字正射影像坐标系变换及精度分析[J]. 测绘科学与工程,2006,26(4):17-20

[10] 王文善,张维忠,李强. 基于OpenCL的腐蚀膨胀算法的并行优化[J]. 青岛大学学报(工程技术版),2023,38(4):22-26

[11] 王晶杰,胡平平. 一种计算机平滑曲线的画法和快速算法[J]. 微处理机,1998,19(3):31-34

[12] 雷先林. 浅谈土方量计算方法及其比较[J]. 建材与装饰,2016(33):88-89

[13] 何成威,吴鼎,梁建波,等. 基于Cesium的倾斜摄影加载优化策略研究[J]. 水利规划与设计,2024(6):105-108

[14] 林宏. Nginx反向代理可视化管理方案研究及编程实现[J]. 贵州师范学院学报,2015,31(12):32-35

[15] 韩冰,高俊钗,雷鸣. 梯度图像的阈值选取[J]. 科学技术与工程,2008,8(16):4 661-4 663