

无人机影像与 GIS 结合的 道路边坡病害空间分布特征研究*

文 ◆ 山西二建集团有限公司

太原理工大学土木工程学院

北京交通大学土木建筑工程学院

山西园区建设发展集团有限公司

张 志 胡孟师 陈振海

蒋 源

贺 怡

宁玉京

引言

无人机影像技术凭借高灵活性、低成本、快速获取数据和高分辨率等优势，可迅速采集大面积边坡影像数据。地理信息系统（GIS）技术拥有高效的数据存管、空间剖析与可视呈现能力，可对多源地理数据开展整合与剖析，为揭示地理现象的空间规则给予技术助力。本文基于道路边坡病害调查的实际要求，经案例剖析确定病害空间分布特性与主要影响因子，为道路边坡病害的动态监控与科学整治提供理论依据和技术参考。

1 无人机影像与 GIS 技术原理

1.1 无人机影像技术

无人机影像技术依托无人机作为飞行载体，配备光学相机、多光谱相机等传感器，按预设航线于空中飞行并拍摄影像，并获取目标区域地表情况。主要原理是依托摄影测量学，处理同一目标区域的多张重叠影像，打造目标区

域的三维模型与正射影像地图，由此提取目标的几何特征与纹理细节。

1.2 GIS 技术

GIS 技术即地理信息系统技术，依托计算机软硬件，对地球表层空间地理分布相关数据开展采集、存储、分析与呈现的技术体系，关键是把地理数据和空间位置结合起来进行数据分析，建立地理数据和空间位置的关联，实现地理现象空间规律的挖掘与可视化呈现。

2 无人机影像与 GIS 结合的研究方法

2.1 数据采集与预处理

2.1.1 无人机影像采集

开展影像采集工作前，对研究区域展开现场调查，弄清楚地形地势、障碍物分布状况和交通情形，确定影像采集的范围与关键区域，借助无人机飞行控制软件开展航线的规划工作，确定飞行高度、速度、航向重合度、旁向重合度等相关参数，并根据影像分辨率确定飞行高度，分辨率计算公式如式（1）所示。

$$GSD = \frac{H \times d}{f} \quad (1)$$

式（1）中， GSD 为地面采样距离（单位：cm/px），其表示影像中每个像素对应的实际地面距离， GSD 越小，影像分辨率越高； H 为无人机飞行相对高度（单位：m）； d 为相机传感器像素尺寸（单位： μm ）； f 为相机焦距（单位：mm）。根据研究需求，本次研究将 GSD 控制在 2cm/px ~ 5cm/px，结合相机参数（像素尺寸 3.76 μm ，焦距 8.8mm），计算得出飞行高度设置为 50m ~ 120m。

2.1.2 GIS 数据收集与整理

利用 GIS 工具（如 ArcGIS）把地形图转化成矢量数据，提取道路

*【基金项目】2023 年度山西省住房和城乡建设厅项目（JJKJ2023010）；山西省大学生创新创业项目（20210112）

【作者简介】张志（1972—），男，山西万荣人，本科，正高级工程师，从事建筑施工与管理工作。

中心线条、边坡边界线、等高线等要素，构建地理基础数据库。对采集的 GIS 数据开展前期处理，涵盖转换数据格式、统一坐标、开展拓扑检查与实施数据清洗，统一把全部数据转换为 Shapefile 格式，使坐标系统全部采用 WGS84 坐标系，保障无人机影像数据和 GIS 数据的坐标相同。同时，开展拓扑检查并修复矢量数据存在的拓扑差错，去除冗余与错误的数据，提高数据质量^[1]。

2.2 数据融合与分析

2.2.1 无人机影像与 GIS 数据融合方法

开展数据融合期间，为衡量数据融合精准度，把点位中误差当作精度评判指标，计算公式如式（2）所示。

$$M = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2}{2n}} \quad (2)$$

式（2）中， M 为点位中误差（单位：m）； n 为检查点数量； (x_i, y_i) 为检查点在 GIS 矢量数据中的坐标； (x'_i, y'_i) 为检查点在无人机正射影像上量测的坐标。本次研究选取 20 个检查点进行精度评估，计算得出点位中误差为 $\pm 0.15\text{m}$ ，满足边坡病害调查的精度要求。

2.2.2 基于 GIS 的空间分析方法

利用核密度估计方式来分析边坡病害在空间上的分布密度，该方法可算出各点周边特定范围的病害点数量，制作病害密度图，清晰展现病害的聚集分布地带^[2]。核密度计算公式如式（3）所示。

$$f_n(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (3)$$

式（3）中， $f_n(x)$ 为点 x 处的核密度估计值； n 为病害点数量； h 为带宽，决定核函数的影响范围， h 越大，密度分布越平滑， h 越小，密度分布越详细，本次研究通过交叉验证法确定 h 值为 50m； d 为空间维度，本次研究为二维空间， $d=2$ ； $K(\cdot)$ 为核函数，采用高斯核函数； x_i 为第 i 个病害点的坐标。

3 案例分析

3.1 研究区域概况

本次研究将我国某山区公路 K25+000—K30+000 段道路边坡设为研究区域，该路段位于我国西南区域，长度为 5km，处于构造剥蚀形成的低山与丘陵区域，地势高低落差明显，海拔处于 650m ~ 980m 范围，研究区域中有 32 个边坡，边坡高度介于 5m ~ 30m，坡率为 1:0.5 ~ 1:1.5，边坡防护手段主要涵盖锚杆框架梁、挂网喷浆以及植草防护方式。案例



图 1 案例区域 BIM 建模 + 航拍融合图

区域 BIM 建模 + 航拍融合图如图 1 所示。

3.2 病害空间分布特征分析

运用无人机影像与 GIS 融合的技术手段，开展研究区域边坡病害的调研剖析，监测结果图如图 2 所示，共提取病害点 48 个，其中滑坡 12 个、崩塌 18 个、剥落 18 个。

从病害类型占比来看，坍塌与剥落类病害占比颇高，岩质边坡易出现坍塌病害，剥落病害大多分布于土质边坡以及风化程度高的岩质边坡，呈现为边坡表层的土层或风化岩层呈片状脱落；浅层滑坡病害多出现于残坡积黏土较厚的边坡，因雨水渗入，土体抗剪切强度下降，易引发浅层滑坡现象^[3]。

通过核密度分析可知，病害表现出显著的空间聚集特征。高密度区域大多集中在 K26+500 至 K27+500 以及 K28+500 至 K29+500 这两个路段，从 K26+500 到 K27+500 的边坡，主要构成是页岩与残坡积黏土层，坡面倾斜度高（1:0.5 ~ 1:0.8）。该路段有一处小型断层，地质结构繁杂，致使病害集中显现；K28+500 至 K29+500 路段的边坡高达 20m ~ 30m，部分防护路段出现损坏状况。因雨水冲刷，低密度分布区集中在 K25+000 至 K26+000 和 K29+500 至 K30+000 这两个路段，此区域边坡多为砂岩，而且坡率比较平缓（1:1.2 ~ 1:1.5），防护手段完备，边坡具备良好稳定性。

将病害图层与坡度、坡向图层进行叠加分析，边坡中坡度处于 $25^\circ \sim 35^\circ$ 的病害发生概率为最高，此区间病害数量占病害总数的比例为 62.5%。坡度低于 25° 的边坡病害发生率为 22.9%。

边坡坡度大于 35° 的情况下病害发生率为 14.6%。从坡面朝向角度分析，南坡、东南坡、西南坡等阳坡病害发生率达 68.8%，阴坡（涵盖北坡、东北坡、西北坡）的病害发生比例是 31.2%。主要原因在于阳坡接受日照的时间长，温度起伏较大，致使岩石风化加速，同时阳坡植被覆盖度较低，边坡防护效能差。

3.3 病害影响因素分析

运用 GIS 叠加与统计分析相融合的手段，自地质情况、地形特性、气候要素以及工程办法 4 个方面实施定量与定性剖析。

地质条件作为影响边坡稳定性的内在要素，把地层岩性图层与病害图层进行叠加，统计各岩性边坡病害的发生情形。残坡积黏土边坡病害出现概率最大，关键在于黏土颗粒彼此间的黏结力微弱，碰到水之后含水率上升、抗剪强度明显降低，进而容易引发浅层滑坡^[4]。页岩边坡出现病害的比例达 58.3%，页岩存在显著的层状结构，一旦遇水软化，层间的抗滑动力就会下降，会导致崩塌与剥落情况出现。

地形状况经由改变边坡的受力情形和外界环境，对病害产生间接作用，整合 DEM 数据和病害统计成果，25° ~ 35° 坡度的边坡中，病害所占比例达 62.5%，处于该坡度时，边坡土体的下滑力与抗滑力处于临界平衡状况。20m ~ 30m 坡高的边坡，其病害发生率为 66.7%，显著高于边坡高度 5m ~ 10m 时的 18.2%。由于边坡坡高增加，边坡所积聚的势能增大，病害出现时，其破坏规模和严重程度会更大，阳坡以 68.8% 的病害发生率远超阴坡的 31.2%。

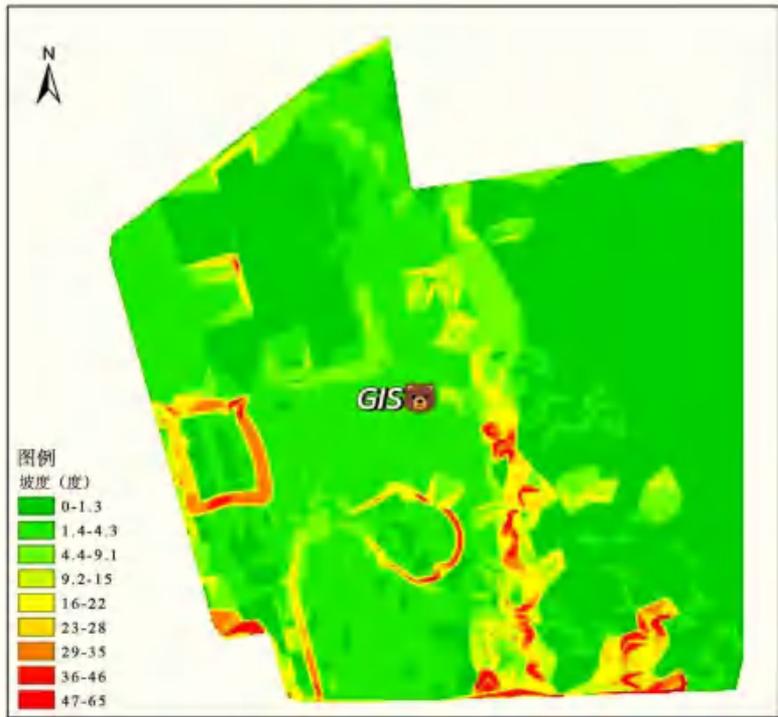


图 2 监测结果图

研究区域亚热带季风气候的降雨特征是病害发生的重要外部触发因素。统计结果显示，可知防护措施完好的边坡病害发生率仅为 18.2%，而防护措施损坏的边坡病害发生率高达 83.3%。锚杆框架梁防护的边坡稳定性最佳，病害发生率仅 11.1%，框架梁可有效约束边坡土体变形，锚杆能将边坡深层岩体与浅层土体锚固为整体，提升抗滑能力。

结语

本研究针对道路边坡病害空间分布特性开展探究，搭建了融合无人机影像与 GIS 的技术方法架构，内在核心要素为地质条件，残坡积黏土与页岩构成的边坡以及断层影响区域病害频发。关键的外部诱因是降雨，6 月至 9 月雨季期间病害占比超八成。防护工程的完好程度直接关乎抗灾能力大小，锚杆框架梁防护成效最为突出，防护措施受损的边坡出现病害的比率高达 83.3%。未来探究可融入深度学习算法来完善病害识别模型，同时融合多时段无人机影像与 GIS 搭建边坡病害动态监测系统，达成病害早预警与精准处理，为道路交通安全提供更周全的技术支持。

引用

[1] 梁玉球.基于无人机倾斜摄影技术的道路边坡变形测量[J].北京测绘,2024,38(12):1739-1744.
 [2] 罗生民,许贵阳,魏培勇,等.基于YOLO-LCMT的铁路边坡典型病害无人机图像智能检测方法[J].铁道建筑,2025,65(4):122-128.
 [3] 罗勋.无人机倾斜摄影与BIM技术结合在市政道路设计中的应用[J].交通科技与管理,2024,5(20):192-194.
 [4] 张青青,熊剑,戴巍.无人机航拍摄影在营运公路边坡病害检测中的应用研究[J].广东公路交通,2020,46(5):21-27.