

无人机低空遥感在黄土丘陵沟壑区地面塌陷研究中的应用

唐文泰, 王末*, 王志民, 赵男, 刘创创

中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊

收稿日期: 2023年4月7日; 录用日期: 2023年5月11日; 发布日期: 2023年5月19日

摘要

黄土丘陵沟壑区地面塌陷是造成地质环境破坏的重要影响因子, 塌陷裂缝为地面塌陷的最主要表现形式。准确掌握塌陷裂缝的特征和发育规律是治理矿区环境破坏的重要基础。以准格尔旗东北部某矿区为研究对象, 进行无人机低空遥感影像解译和实地踏勘进行研究比较, 分析地表裂缝的特征, 总结地裂缝的分布和发育规律。研究表明, 地面塌陷类型主要为地表裂缝、塌陷槽、塌陷坑。地面裂缝极其发育, 宽度在10~120 cm之间, 长度均大于30 m, 呈平行式阶梯状分布, 错台高度一般在15~130 cm左右, 最大2.5 m, 整体以弧型为主兼有直线型。塌陷槽发育在工作面风巷外围, 宽度约为1~10 m, 可见深度达几米, 长度延伸较长, 最长达300 m。塌陷坑发育于巷道切眼位置, 呈圆形, 最大直径为73 m, 深30 m。研究结果能够有效掌握地面塌陷的形态、分布规律及特征, 为塌陷监测提供了较好的基础数据, 为矿山生态修复提供有力技术支撑。

关键词

低空遥感, 塌陷裂缝, 地面塌陷, 生态修复

Application of UAV Low Altitude Remote Sensing in Ground Collapse Study in Loess Hilly and Gully Region

Wentai Tang, Mo Wang*, Zhimin Wang, Nan Zhao, Chuangchuang Liu

Langfang Center for General Survey of Natural Resources, CGS, Langfang Hebei

Received: Apr. 7th, 2023; accepted: May 11th, 2023; published: May 19th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 唐文泰, 王末, 王志民, 赵男, 刘创创. 无人机低空遥感在黄土丘陵沟壑区地面塌陷研究中的应用[J]. 自然科学, 2023, 11(3): 402-411. DOI: 10.12677/ojns.2023.113048

Abstract

Ground collapse in the loess hilly and gully region is an important factor causing the destruction of geological environment, and the collapse crack is the main manifestation of ground collapse. It is an important basis for controlling environmental damage in mining area to accurately grasp the characteristics and development law of collapse fractures. Taking a mining area in the northeast of Jungeer Banner as the research object, low-altitude remote sensing image interpretation of unmanned aerial vehicle and field survey were carried out to analyze the characteristics of surface cracks, and the distribution and development law of ground cracks were summarized. The research shows that the main types of ground collapse are surface crack, collapse trough and collapse pit. The ground cracks are extremely developed, ranging from 10~120 cm in width and more than 30 m in length. They are distributed in a parallel stairway. The height of the fault platform is generally about 15~130 cm and the maximum is 2.5 m. The collapse trough is developed in the periphery of the working face wind roadway, with a width of about 1~10 m, a visible depth of several meters, and a long length, up to 300 m. The collapse pit is developed at the position of the roadway cutting hole. It is circular, with a maximum diameter of 73 m and a depth of 30 m. The research results can effectively master the form, distribution law and characteristics of ground collapse, provide better basic data for subsidence monitoring, and provide strong technical support for mine ecological restoration.

Keywords

Low Altitude Remote Sensing, Collapse Crack, Ground Collapse, Ecological Restoration

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

党的十八大以来,习近平总书记对生态文明建设做出了一系列重要论述。“绿水青山就是金山银山”是我国矿产资源开发必须要坚持的理念[1]。“十四五”规划关于扎实推进黄河流域生态保护和高质量发展合理明确提出,控制煤炭开发强度,推进能源资源一体化开发利用,加强矿山生态修复[2]。《关于加强矿山地质环境恢复和综合治理的指导意见》明确,到2025年我国矿山地质环境恢复和综合治理的阶段性目标是,全面建立动态监测体系,保护与治理恢复责任全面落实,新建和生产矿山地质环境得到有效保护和及时治理[3][4],历史遗留问题治理取得显著成效。

国外欧美发达国家就已经开始重视矿山开采对环境的破坏问题,众多学者已经取得一些研究成果。在矿区监测方面,Chen等[5]利用获取高分辨率露天矿地形和坡度局部长度自动相关指标(SLLAC)[6]来描述露天矿的特征,并测试了一个简单的经验模型,以得出人工地面的百分比,Kršák[7]等以Jastrabá表面形态复杂的地表矿为测试区使用低成本无人机摄影测量获取的数字高程模型(DEM)并证明由无人机摄影测量数据创建的模型达到了当前国家立法要求的精度。并且无人机摄影测量和遥感及地理信息系统软件进行处理,可以得出光谱信息、植被和土壤指数、结构信息和土地覆盖图[8],以监测矿区开采后的修复过程,为科学家、环境部门等决策者服务。

近年来,中国煤炭产业发展迅速,在规范煤炭生产,恢复采后治理方面加大施行力度。国内学者也

在矿区进行了大量的研究,随着煤炭资源的持续开采,地表产生大面积塌陷[9][10],地下水位大幅下降,生态环境破坏问题越来越突出,针对黄土丘陵地形复杂、沟壑纵横,近年来国内外在地裂缝地面塌陷研究方面已经取得了一定效果,汤伏全等[9]利用榆神矿区金鸡滩煤矿某综放工作面与低空无人机摄影测量相结合,采用掩膜算法对地表裂缝进行提取;杨奇让等[11]基于面向对象的监督分类进行煤矿区地表采动裂缝提取;吴敏杰[12]采用无人机低空遥感、热红外等遥感技术,进行研究区地表隐蔽灾害的快速扫面排查;本次的研究区位于准格尔旗东北部,以研究区工作面井下开采所产生的地表塌陷区域为研究对象,分析了地面塌陷的主要类型,利用低空无人机航测技术总结了地表裂缝发育规律。

2. 研究区概况

2.1. 研究区地理及地形地貌

研究区地处准格尔旗东北部,地表为广袤的黄土高原,很大面积被黄土和风积沙覆盖。地表海拔标高 1127 m~1346 m,比高 219 m,地表标高的变化总趋势为由西南向东北降低。由于该地区雨季水流量大、动力强、水土流失严重,且地表黄土层受流水等自然作用,地表冲沟发育较为完全,沟壑纵横交错、沟深壁陡的复杂地形[13][14]。煤矿范围内大小不连沟、水涧沟等发育,支沟发育,各沟横截面基本为 U 字型(见图 1),形成陡峻的峡谷。

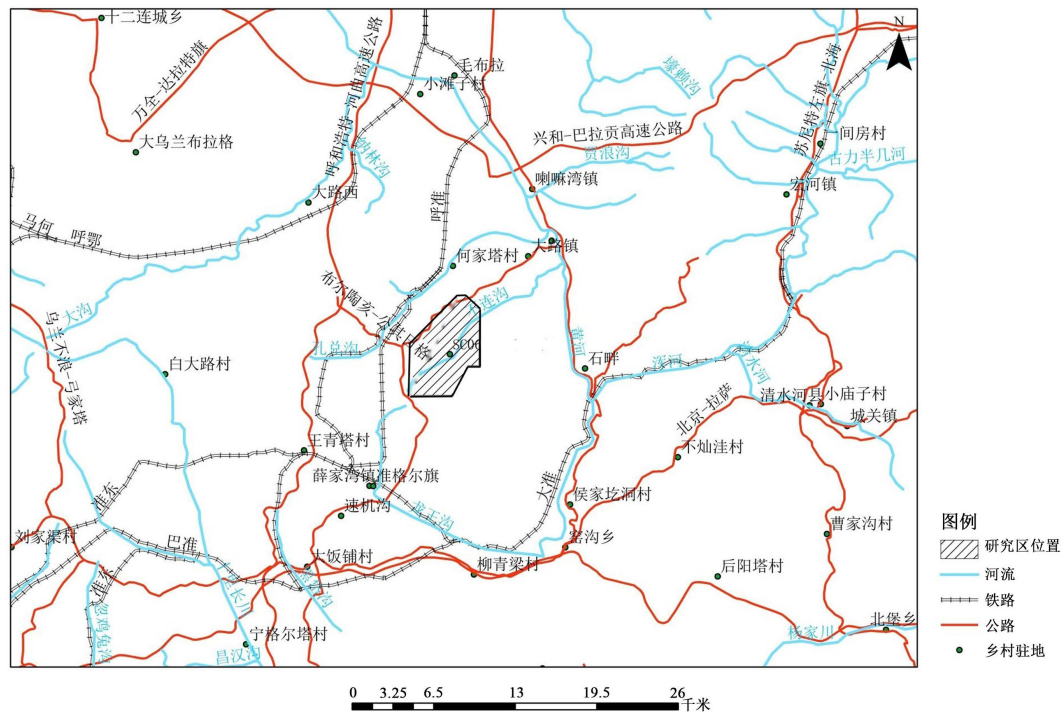


Figure 1. Traffic location map of the study area

图 1. 研究区交通位置图

2.2. 研究区开采状况

研究区始建于 2008 年 8 月,生产规模 500 万 t/a。矿井采用主、副斜井开拓方式,主副斜井井底落在井田 6 号煤层赋存最高处后,沿南北方向布置开拓大巷,双翼开采。6 号煤层及 6 下煤层设一组开拓巷道,9 号煤层及 9 上煤层设一组开拓巷道(见图 2)。采用主斜井、副斜井和回风立井入风,回风立井回

风, 通风系统为混合式, 通风方式采用抽出式。采煤方法是长壁式采煤法, 顶板管理均为全部陷落法, 采煤工艺为综合机械化放顶煤开采。地层由老至新依次为奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、白垩系、第四系。根据矿区地层岩性、岩土体物理力学性质、岩体结构及工程地质特征, 岩石单向抗压强度为 30-60 MPa, 属于中等硬度, 矿区内岩体类型主要为硬质岩。硬质岩: 矿体及围岩均由层状、似层状变质砂岩、变质砾岩等硬质岩石组成, 整体岩石力学强度高。

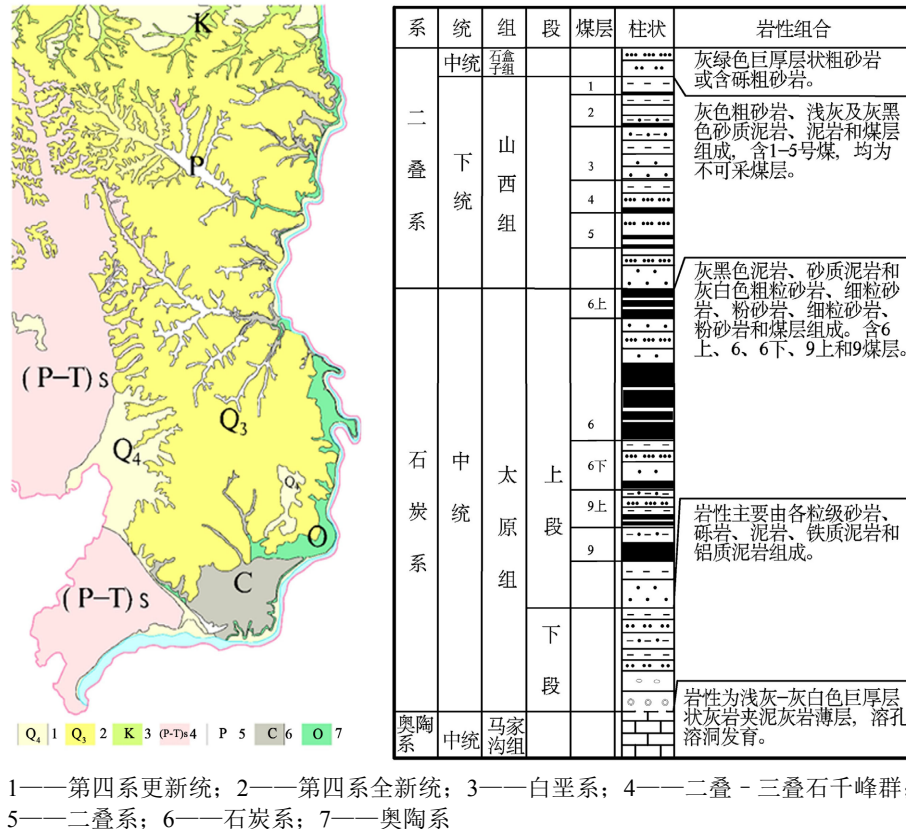


Figure 2. Column diagram of stratigraphy and coal-bearing stratigraphy in the study area
图 2. 研究区地层及含煤地层柱状图

3. 无人机航测

3.1. 无人机低空遥感

无人机遥感技术作为遥感影像资料获取手段之一, 具有方便、快捷、高分辨率、低成本等特点[2] [15] [16]。近几年来, 无人机低空遥感在矿区地裂缝提取工作中在广泛应用。侯恩科[17]等利用无人机遥感技术成功采集了地面塌陷的特点规律。本文采用无人机低空遥感航测技术, 分析了地面塌陷的主要类型, 与踏勘实地相互对比, 分析总结了地表裂缝发育规律及特征。

3.2. 无人机基本简介

本次研究区采用飞马 D20 无人机(见图 3), 飞马 D20 为搭载重旋翼无人机系统, 核心传感均采用三路备份、安全可靠, 配备前向可控毫米波雷达及视觉感知系统, 可实现测高、避障及辅助导航功能, 无人机参数(见表 1)。可在矿区、桥梁、水面舰艇上起降和飞行, 在复杂条件下, 确保飞行更安全、抗干扰

能力更优秀。此外, D20 基于单轴云台毫米波雷达, 可实现直接测距定高的高精度仿地飞行, 进一步降低对三维地理底图精度和网络条件的依赖。



Figure 3. Pegasus D20 UAV
图 3. 飞马 D20 无人机

Table 1. List of UAV parameters
表 1. 无人机参数一览表

指标	起飞重量	巡航速度	最大续航时间	起降方式	控制距离	载荷模块	飞行速度
参数	21 kg	18 m/s	80 min	无遥控器 垂直起降	50 km	多载荷 可互换	S 模式: 23 m/s

3.3. 航飞路线及像控点布设

首先利用 GIS 软件, 依据研究区范围及实际需要, 下载满足航测要求的地图, 作为无人机飞行底图。然后在无人机管家软件中, 根据前期踏勘及资料收集情况在飞行底图上进行航摄设计。根据技术要求, 研究区航测成图比例尺为 1:1000, 所以无人机飞行相对航高设为 400 m; 测区海拔最高点和最低点对应的地面分辨率分别为 5 cm 和 7 cm; 旁向重叠度: 65%; 航向重叠度: 80%; 单架次无人机飞行时间不超过 50 分钟, 共布设 4 架次(见图 4)。根据研究区实际情况制定了无人机飞行应急预案, 对在本研究区无人机航测作业过程中可能出现的紧急情况或其他不可预见情况发生时地面人员所采取的正确处理措施进行了规定。

研究区 4 个架次航飞均采用飞马 D20 无人机。根据《低空数字航空摄影测量外业规范》的要求, 结合飞马 D20 无人机的技术特点, 在航摄前实地布设像控点标志[18]。像控点均布设在单架次飞行区域的四角和中心, 共计布设像控点 14 个。像控点应用直角模具涂刷, 涂刷大小 > 50 cm, 并且菱角不虚边; 编号涂刷, 字体清晰, 字体高度 > 30 cm (如图 4), 布设的像控点标志采用红色油漆喷涂。

像控点采用 RTK 实测, 使用 RTK 固定解计算, 使用 CGCS2000 坐标系, 平面误差 < 0.01 m, 高程误差 < 0.025 m。无人机每次起飞前均按规程认真检查飞机和相机的电池电量、以及其它机载设备的工作状态无异常。无人机采用垂直起飞, 起飞风力不大于 3 级。无人机飞行过程中, 无人机飞行状态正常, 空速为 14 m/s, 地面操控站与无人机间距离小于 3 km, 基本全程保持地面操控站于无人机之间的通讯畅通。

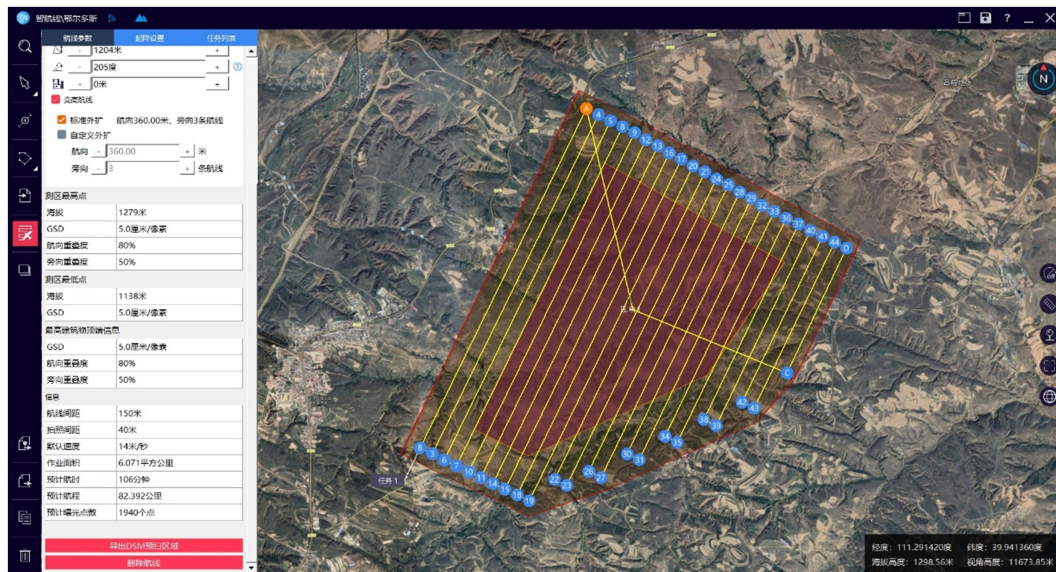


Figure 4. UAV aerial survey roadmap
图 4. 无人机航测路线图

3.4. 无人机航测处理流程

本次研究区无人机飞行全部选择在 9:00~15:00 之间, 阴影对航摄影响较小时进行。航飞时天气状况相对较好, 风力 2 级, 风向南风, 摄影方向 205°, 航线 27 条, 焦距 25 mm (下视) 35 mm (倾斜), 像片倾角平均小于 5°, 像片旋角平均小于 15°。由于重叠度高, 无相对漏洞和绝对漏洞, 以上要素均满足《低空数字航空摄影规范》的要求(见图 5)。航摄像片影像清晰、层次丰富、反差适中、彩色色调柔和鲜艳、均匀, 相同地物的色彩基本一致, 满足正射影像制作的要求。

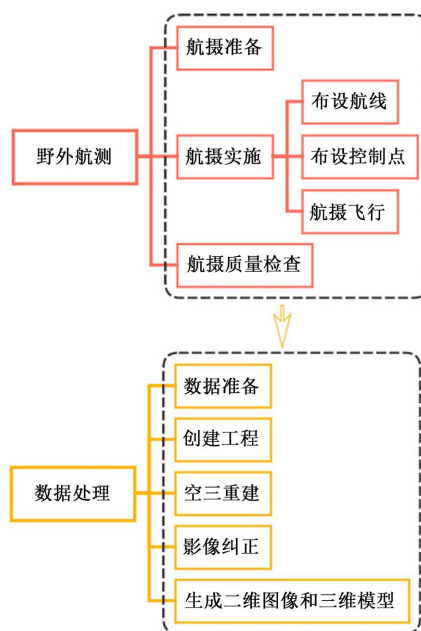


Figure 5. UAV aerial survey processing flow chart
图 5. 无人机航测处理流程图

3.5. 航测成果

本研究区根据无人机管家软件进行的计算分析,经空三加密后自动生成点云数据[19][20],无人机管家软件对其进行正射纠正后生成数字正射影像DOM(见图6),DSM数字地表模型(见图7),对生成的DOM进行影像质量检查,高架桥、立交桥、大坝等引起的影像拉伸和扭曲应进行了相应处理。最后对镶嵌影像进行色彩、亮度和对比度的调整,通过匀色处理缩小影像间的色调差异,使色调均匀、反差适中、层次分明,保持地物色彩不失真。使研究区能清晰反映出地貌特征,可以用于研究区地貌分析以及地面裂缝发育解译、评估工作。



Figure 6. Aerial flight image of DOM drone in the study area
图 6. 研究区 DOM 无人机航飞影像图

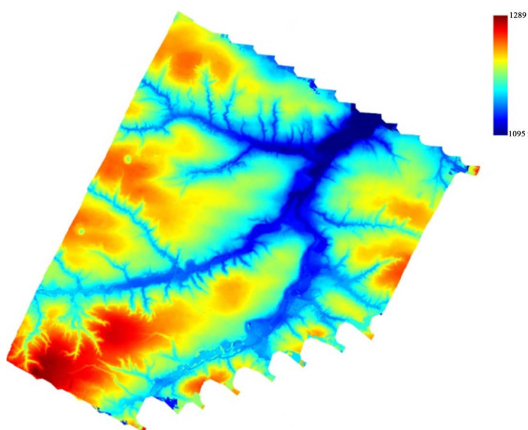


Figure 7. DSM aerial flight images of the study area by UAV
图 7. 研究区 DSM 无人机航飞影像图

4. 地表裂缝特征及分布规律

4.1. 地表裂缝特征及规律

对航测结果利用人工解译的方法进行后期处理,得到地表裂缝分布图,结合野外调查可知,该工作面地面塌陷类型主要为地表裂缝、塌陷槽、塌陷坑(见图8)。地裂缝极其发育,宽度在 10~120 cm 之间,

长度均大于 30 m，呈平行式阶梯状分布，错台高度一般在 15~130 cm 左右，最大 2.5 m，整体以弧型为主兼有直线型。塌陷槽发育在工作面风巷外围，宽度约为 1~10 m，可见深度达几米，长度延伸较长，最长达 300 m。塌陷坑发育，位于巷道切眼位置，呈圆形，最大直径为 73 m，深 30 m。

该研究区工作面地表裂缝有两种类型。一类是沿单个工作面方向，巷道外围多是平行于巷道，裂缝之间距离为，裂缝在自然作用和地表破坏区形成下错，错台高度一般在 15~130 cm 左右。巷道内多为半圆柱形状、圆形及弧形，与巷道多数成垂直角度。另一类为沟槽中形成线性裂缝，该组裂缝长短不一，在顺槽往外一定范围内缓慢发育。

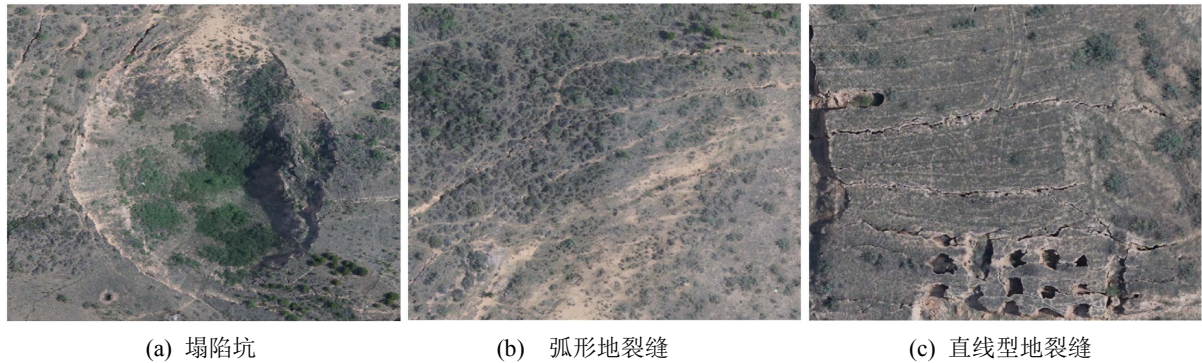


Figure 8. Types of ground collapse in the study area

图 8. 研究区地面塌陷类型

4.2. 发育规律

通过对研究区无人机低空航测，实地踏勘及工作面地表裂隙资料验证可以看出，裂缝与地表拉伸存在一定关系，当拉伸达到 5 mm 时，开始出现裂缝，在一些面积较小的山丘地形时裂缝偏小，在沟壑发育的区域时缝隙偏大。缝隙的发育深度与宽度之间存在正比例增大关系，地表宽度相对越大，其裂缝发育越深，并且随着时间推移和自然作用的加大，裂缝的宽度和长度都会逐渐增大和延伸，部分缝隙多为下错。塌陷槽发育在工作面风巷外围，宽度约为 1~10 m，可见深度达几米，长度延伸较长，最长达 300 m。宽度较大的缝隙产生是地下开采阶段引起的地表反应，小缝隙多为较大缝隙的伴生裂缝(见图 9)。

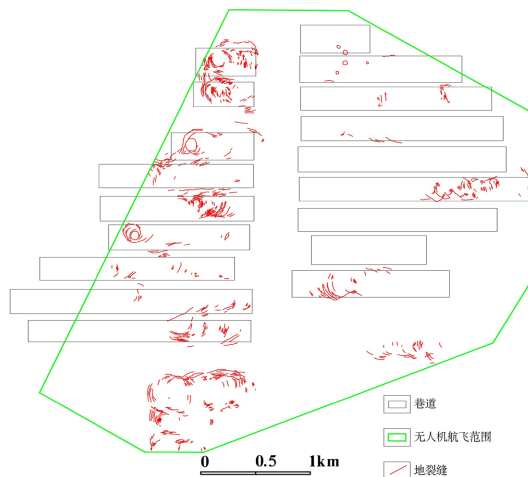


Figure 9. Distribution of collapse cracks in the study area

图 9. 研究区塌陷裂缝分布图

5. 结论

1) 利用无人机低空航测技术, 分析出研究区因煤矿开采所产生地面塌陷类型主要为塌陷裂缝、塌陷槽、塌陷坑, 其中以塌陷裂缝为主要表现形式。塌陷裂缝极其发育, 宽度在 10~120 cm 之间, 长度均大于 30 m, 呈平行式阶梯状分布, 错台高度一般在 15~130 cm 左右, 最大 2.5 m, 整体以弧型为主兼有直线型。塌陷槽发育在工作面风巷外围, 宽度约为 1~10 m, 可见深度达几米, 长度延伸较长, 最长达 300 m。塌陷坑发育, 位于巷道切眼位置, 呈圆形, 最大直径为 73 m, 深 30 m。

2) 裂缝与地表拉伸存在一定关系, 在一些面积较小的山丘地形时裂缝偏小, 在沟壑发育的区域时缝隙偏大。缝隙的发育深度与宽度之间存在正比例增大关系, 地表宽度相对越大, 其裂缝发育越深, 并且随着时间推移和自然作用的加大, 裂缝的宽度和长度都会逐渐增大和延伸, 部分缝隙多为下错。塌陷槽发育在工作面风巷外围, 宽度约为 1~10 m, 可见深度达几米, 长度延伸较长, 最长达 300 m。宽度较大的缝隙产生是地下开采阶段引起的地表反应, 小缝隙多为较大缝隙的伴生裂缝。

3) 采用无人机高空间分辨影像对典型采煤塌陷调查中效果较好, 能够有效掌握采空塌陷地裂缝的长度、形态、分布规律及特征, 为塌陷类型、地裂缝等研究提供了较好的基础数据, 为矿山生态修复提供有力技术支撑。

基金项目

中国地质调查局项目《滦河流域中上游生态修复支撑调查》(编号: DD20220204)。

参考文献

- [1] 岳喜能, 王志民, 秦越强, 李朋元, 张鑫, 辛凯, 邢承元. 基于 UAV 航测的浅埋煤层开采地表裂缝发育规律研究——以串草圪旦煤矿为例[J]. 自然科学, 2022(6): 960-968.
- [2] 郝明, 林惠晶, 高彦彦. 基于改进主动轮廓模型的无人机影像矿区地裂缝提取[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(12): 2448-2457.
- [3] 刘春, 艾克然木·艾克拜尔, 蔡天池. 面向建筑健康监测的无人机自主巡检与裂缝识别[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(7): 921-932, 918.
- [4] 李锋. 基于无人机及深度学习的桥梁结构裂缝智能识别[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [5] Chen, J., Li, K., Chang, K., et al. (2015) Open-Pit Mining Geomorphic Feature Characterization. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **42**, 76-86. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.05.001>
- [6] Sofia, G., Marinello, F. and Tarolli, P. (2014) A New Landscape Metric for the Identification of Terraced Sites: The Slope Local Length of Auto-Correlation (SLLAC). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **96**, 123-133. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.06.018>
- [7] Kršák, B., Blišťan, P., Paulíková, A., et al. (2016) Use of Low-Cost UAV Photogrammetry to Analyze the Accuracy of a Digital Elevation Model in a Case Study. *Measurement*, **91**, 276-287. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.028>
- [8] Padró, J., Carabassa, V., Balagué, J., et al. (2019) Monitoring Opencast Mine Restorations Using Unmanned Aerial System (UAS) Imagery. *Science of the Total Environment*, **657**, 1602-1614. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.156>
- [9] 汤伏全, 李林宽, 李小涛, 刘世伟. 基于无人机影像的采动地表裂缝特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 130-136.
- [10] 吴芳, 李瑜, 金鼎坚, 李天祺, 郭华, 张琦洁. 无人机三维地障信息提取技术应用于航空物探飞行轨迹规划[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 286-292.
- [11] 杨奇让, 胡振琪, 韩佳政, 杨坤, 浮耀坤. 煤矿区无人机影像采动地表裂缝提取方法研究[J/OL]. 煤炭科学技术, 2023: 1-13, 2023-04-07.
- [12] 吴敏杰. 无人机在煤矿地表隐蔽灾害排查中的应用[J]. 煤矿安全, 2021, 52(11): 123-129.
- [13] 王辉. 基于深度学习的无人机影像地表裂缝自动提取[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.

-
- [14] 徐十锋, 吕文星, 高亚军, 李虎. 无人机遥感技术在麻地梁煤矿中的精度分析及应用[J]. 采矿技术, 2022, 22(1): 155-158.
- [15] 魏长婧, 汪云甲, 王坚, 赵慧. 无人机影像提取矿区地裂缝信息技术研究[J]. 金属矿山, 2012(10): 90-92, 96.
- [16] 杨娜, 张翀, 李天昊. 基于无人机与计算机视觉的中国古建筑木结构裂缝监测系统设计[J]. 工程力学, 2021, 38(3): 27-39.
- [17] 侯恩科, 首召贵, 徐友宁, 杨帆, 何芳, 谢晓深, 高冠杰. 无人机遥感技术在采煤地面塌陷监测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 102-110.
- [18] 李怡静, 程浩东, 李火坤, 王姣, 胡强. 基于改进 U²-Net 与迁移学习的无人机影像堤防裂缝检测[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6): 52-59.
- [19] 赵毅鑫, 许多, 孙波, 姜耀东, 张村, 何祥. 基于无人机红外遥感和边缘检测技术的采动地裂缝辨识[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 624-637.
- [20] 赵毅鑫, 许多, 张康宁, 令春伟, 陶亚飞, 郭晓冬, 孙波. 采动地表浅层隐蔽裂缝的无人机红外识别现场试验[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1921-1932.