

doi: 10.6046/zrzyg.2022170

引用格式: 于航,安娜,汪洁,等. 黔西南采煤塌陷区高分遥感动态监测——以六盘水市煤矿采空塌陷区为例[J]. 自然资源遥感,2023,35(3):310–318. (Yu H, An N, Wang J, et al. High-resolution remote sensing-based dynamic monitoring of coal mine collapse areas in southwestern Guizhou: A case study of coal mine collapse areas in Liupanshui City[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(3): 310–318.)

黔西南采煤塌陷区高分遥感动态监测 ——以六盘水市煤矿采空塌陷区为例

于航, 安娜, 汪洁, 邢宇, 许文佳, 步凡, 王晓红, 杨金中
(中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要:我国西南地区是地质灾害高发区,在矿产资源开发过程中极易引发地质灾害和相关次生灾害。为研究采煤塌陷区遥感动态监测技术,以贵州省六盘水市煤矿开采集中区为研究区,利用高空间分辨率遥感影像,通过建立黔西南山原地区采煤塌陷遥感地质解译标志,对六盘水地区2009—2018年地质灾害情况进行了动态监测,并分析了研究区的地质灾害现状。根据遥感解译成果,发现该地区地质灾害情况多年来明显加剧,相较于2009年,2018年地质灾害面积扩大167%,且新增地质灾害区域面积占40%、变差区域面积增加34%。根据研究区地质灾害程度划分出4个地质灾害集中区,发现地质灾害集中区和该地区采矿密集区域高度重合。根据遥感数据剖析了矿山地质灾害损毁地类类型,判断研究区矿山地质灾害可能对广大人民和生态环境产生的危害情况,其中对土地严重损毁的灾害类型中,毁损面积最大的为林地和耕地(共193处),面积总计约为333.55 hm²。研究区内共有潜在隐患威胁区域360处,面积为506.36 hm²,其中对道路威胁数量最多(共有126处),面积为110.04 hm²。研究结果可为当地生态环境修复和矿山地质灾害治理提供可靠参考数据和重要研究思路,并针对研究区的特点,深入分析该地区矿山地质灾害成因,探讨治理方案,提出对策建议。

关键词:六盘水市; 矿山地质灾害; 遥感监测; 采煤塌陷区

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)03-0310-09

0 引言

矿山地质环境问题是矿产活动产生或加剧的地质环境恶化现象,主要包括地质灾害(崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷和地裂缝等)、含水层破坏、地形地貌景观破坏和土地资源破坏等^[1-2],由煤矿采空等原因造成的矿山地质环境问题尤为严重。煤矿采空区地表塌陷(简称采煤塌陷)是地下采煤活动破坏了煤层围岩的应力平衡,在应力重布、达到新的平衡过程中地面变形所形成的塌陷盆地、漏斗状塌陷坑和台阶状断裂。采煤塌陷的危害主要表现为损毁土地、破坏建筑物和破坏水利、交通、输电等基础设施^[3-5]。长期以来,矿山地质灾害调查一直采用群众举报、实地调查和逐级统计上报模式,不仅速度慢,而且标准难以统一。受空间视野的限制,很难对大范围的地质灾害全面了解和掌握,更难进行矿山地质灾害的预测预报。而现代对地观测和遥感技

术的发展,特别是卫星遥感数据空间分辨率和光谱分辨率的不断提高,逐渐突破了卫星遥感对宏观地质灾害进行微观研究的限制,为矿区地质灾害研究提供了重要手段^[6-7]。

针对矿山地质灾害已有许多研究,徐刚等^[8]通过1:5万专题遥感解译和地质调查,划分了地质灾害危险区;冯雨林等^[9]建立了灾害体的3D仿真模型,提取泥石流灾害体的特征信息;杜培军等^[7]提出了煤矿区地质环境与地质灾害遥感监测系统;宁树正等^[10]应用遥感图像与数字高程模型相结合的方法进行煤矿区沉降及监测;濮国梁等^[11]采用数据融合技术,提高了滑坡和崩塌的解译精度;顾广明等^[12]开展了“3S”技术在煤矿区开发现状及环境调查与监测的应用;尚红英等^[13]研究了利用遥感技术开展矿山动态监测的方法与技术路线;乔彦肖等^[14]采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP),对地质灾害及孕灾环境进行综合评价。已有

收稿日期: 2022-04-28; 修订日期: 2022-12-12

基金项目: 中国地质调查局项目“全国矿山开发及重点地区生态空间遥感监测”(编号: 202012000000210017)资助。

第一作者: 于航(1990-),男,工程师,主要从事遥感矿产地质、自然资源、土地研究。Email: 591701381@qq.com。

通信作者: 安娜(1980-),女,高级工程师,主要从事遥感矿产地质、自然资源、土地研究。Email: an_na826@163.com。

研究使得矿山地质灾害监测手段和方法技术有了较大进步和提高^[15]。研究区贵州省六盘水市地处西南高原,采矿多通过地下开采,而这种开采模式往往会破坏地层内部原有的力学平衡状态,导致采空区上方地表发生移动和变形^[16]。根据西南地区特点和沙永莲等^[17]利用 InSAR 数据对采煤塌陷的分析,采空塌陷会对地形地貌产生巨大破坏,更容易产生较大的地形形变和采煤漏斗区。由桑潇等^[18]和杨显华等^[19]研究得知,西南地区的采空塌陷多位于地势陡峭的山区,而西南雨季降雨频发,在煤炭开采密集区和采空塌陷集中区,大范围的地下采矿导致林地被大量破坏,裸地面积大范围增加,岩体破碎,活动性断裂发育,致使采矿引发了采空塌陷;同时极易引发地裂缝和崩塌等次生灾害,形成矿山地质灾害群。

本文在前人研究基础上,利用 2009 年和 2018 年高分辨率遥感数据,建立贵州省六盘水地区煤矿采空塌陷区的地质灾害解译标志,加以解译和监测研究区多年地质灾害变化情况和现状,并进行成因分析,提出对策建议。旨在总结出一套针对黔西南山原地区独特自然条件的矿山地质灾害遥感监测方法,为类似地区矿山地质灾害的遥感监测提供借鉴。

1 研究区概况和数据源

1.1 研究区概况

贵州省六盘水市矿产资源丰富,以煤矿为主;但滑坡、滑塌、地裂缝和塌陷坑等地质灾害频发。本文选取贵州六盘水市煤矿采空塌陷区作为地质灾害研究区,其地理坐标为 E110°27′~105°01′,N25°17′~26°04′,面积约 4 105 km²,属于黔西南山原地区。研究区涉及六盘水市盘县、普安县、兴义市,区内有煤矿 100 余个(图 1)。

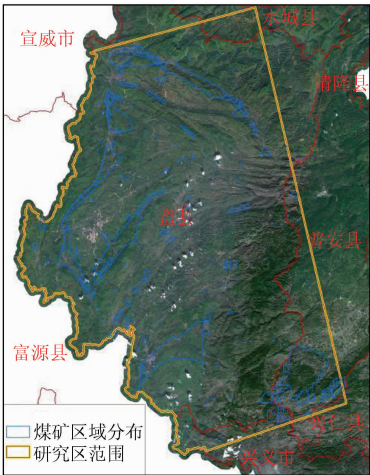


图 1 六盘水市研究区 RapidEye 遥感影像煤矿分布

Fig.1 RapidEye remote sensing image of mine geological disaster study area in Liupanshui City

研究区地处滇、黔交界,是云南高原向黔中山原过渡的斜坡地带。该地区地形起伏较大,以高原山地为主,整个地势由西北向东南倾斜,中南部隆起。区内河流发育,切割强烈,沟谷纵横,降雨集中,形成多级河流冲积阶地、落水河及深切河谷等地貌特征。海拔在 1 500~2 000 m 之间,海拔最低点和最高点高差超过 2 000 m,发育有溶蚀地貌、溶蚀-侵蚀构造地貌、剥蚀-侵蚀地貌 3 大成因地貌。区内植被茂盛,以林地和耕地为主。

六盘水市矿区矿产资源丰富,尤以煤炭资源为最,素有西南“煤都”之称。研究区位于扬子准地台西南缘,属黔西南普安旋扭构造变形区西南部,出露地层以泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系为主,由一系列浅海-半深海及海陆交互相的碳酸盐岩、碎屑岩、硅质岩、含煤地层组成。含煤地层主要为二叠系龙潭组,分为 3 段,下段以粉砂岩、泥岩为主,其中细砂岩由玄武岩岩屑和凝灰岩岩屑组成,并有生物灰岩夹层,含煤多层,但厚度不大;中段以砂岩、粉砂岩为主,是主要含煤段,含煤几十层,包括 1~2 层厚煤层;上段由砂岩、粉砂岩和泥岩组成,夹薄层灰岩及黑色泥岩,含煤几十层,薄及中厚煤层均有,一般较稳定。煤炭以焦煤为主,并有部分贫煤、肥煤和瘦煤。区内已探明煤炭储量为 105 亿 t,远景储量为 380 多亿 t,主要呈条带状分布^[20-26]。

1.2 数据源

收集了历史遥感数据、多年矿山相关数据(采矿权、历史地质环境资料等)以及“全国矿产资源开发环境遥感监测”二级项目取得的研究区地质灾害矢量数据。此外,还收集了 2009 年和 2018 年的遥感卫星数据(表 1)。其中,2009 年为监测基准年数据,用于对比分析 2009—2018 年研究区地质灾害遥感动态变化情况。2009 年国产卫星数据较少,采用 RapidEye 数据进行分析,随着国产卫星日新月异发展,2018 年国产卫星数据大面积普及,采用国内外卫星混合遥感数据监测研究区,取得很好的效果^[27-28]。

表 1 研究区 2009 年和 2018 年卫星数据

Tab.1 Satellite data of the study area in 2009 and 2018

年度	数据源	空间分辨率/m	处理方法
2009 年	RapidEye	5	全色与多光谱数据融合
2018 年	P1 + GJ1 + SPOT6 + RE	0.5 + 2.5	全色与多光谱数据融合

2 解译标志建立与数据处理

2.1 解译标志建立

根据研究区地质灾害特点建立遥感解译标志,

主要包括滑坡、滑塌、地裂缝和塌陷坑 4 个部分。解

译标志如图 2 所示。

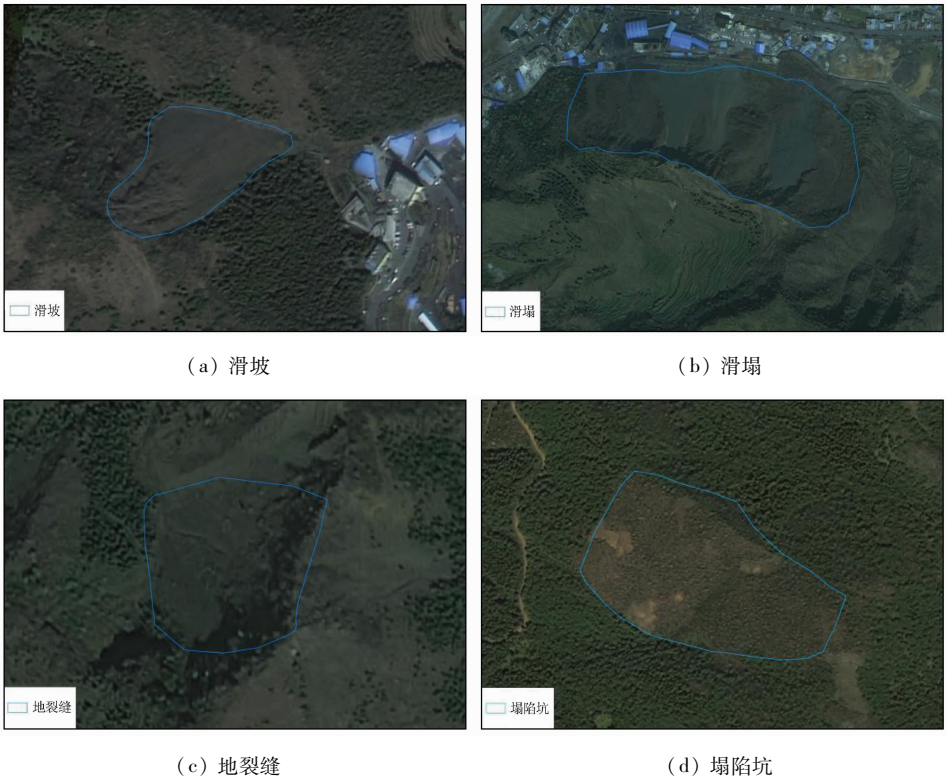


图 2 研究区遥感数据解译标志

Fig. 2 Interpretation keys of remote sensing data in the study area

2.1.1 滑坡

就遥感影像解译而言,由于不能直接看到滑坡体的地下部分,因此只有滑坡体、滑坡后壁和滑坡边界 3 项地形要素。①地形地貌标志:表现在局部地貌和整体地貌的不协调,连续地貌形态突然破坏;②形态标志:在影像上能够明显看到形态与边界,滑坡边界主要表现为弧型、圈椅型、马蹄型、新月型和不规则型等,滑坡后壁较高与坡体呈明显的分界线或呈陡崖;③色调及色彩:老滑坡与新滑坡的坡壁由于植物的生长发育不同而能明显区分,新滑坡色调较浅,土体植被覆盖度较差,滑体保存较好;老滑坡色彩较深,植物覆盖度较好,滑体因长时间侵蚀保存较少^[29-32](图 2(a))。

2.1.2 滑塌

滑塌一般出现在基岩出露地区,在岩石崩塌的同时伴随着红土崩塌。滑塌一般伴随着崩塌和滑坡同时发生。在遥感影像上,滑塌后壁通常表现为强反射的浅色调,滑塌堆积表现为松散的堆积状。通常,滑塌个体比崩塌个体要大^[33](图 2(b))。

2.1.3 地裂缝

在遥感影像上,地裂缝呈线状分布,延伸方向基本稳定,色调明显异于两侧。有平行排列型、折线型和蠕虫型等,或截断道路,或穿过山梁。在滑坡体或

崩塌体的中后缘及两侧等处,地裂缝极为常见^[34-39](图 2(c))。

2.1.4 塌陷坑

塌陷坑比塌陷盆地规模小,一般多出现在开采急倾斜煤层时;开采缓倾斜煤层时,只有在某种特殊地质条件下有可能出现塌陷坑。塌陷坑按其形状分为漏斗塌陷坑和槽型塌陷坑 2 种类型。山区地面塌陷往往形成塌陷坑,多为圆形或椭圆形,一般没有与其连接的道路,这是区别于其他采矿活动的重要特征^[40-46](图 2(d))。

2.2 数据预处理

本文利用 ENVI 和 Erdas 等相关遥感软件,对获取的遥感数据进行大气校正、建立金字塔和几何纠正等预处理,之后对影像进行正射校正、波段融合、影像镶嵌和影像调色等处理,使影像达到解译标准。根据建立的遥感解译标志进行人机交互解译和影像分析识别,获得解译和识别结果。

3 结果与分析

3.1 解译结果

根据 2009 年历史遥感影像,提取了整个研究区 2009 年度地质灾害信息。结果显示,2009 年共有地

质灾害 168 处,面积为 340.01 hm²; 2018 年扩大了 167%,达到 457 处,面积为 568.09 hm²。其中,地裂缝群 3 处,面积为 1.26 hm²,2018 年扩大了 730%; 有隐患的滑坡 137 处,面积为 141.30 hm²,2018 年扩大了 108%; 滑塌群 23 处,面积为 191.02 hm²,2018 年扩大了 26%; 塌陷坑群 5 处,面积为 6.43 hm²,2018 年扩大了 249%。详情见表 2。

表 2 研究区地质灾害变化情况统计(2009—2018 年)

Tab.2 Statistics of geological hazard changes in the study area(2009—2018) (hm²)

年份	塌陷坑(群)	地裂缝(群)	有隐患滑坡	滑塌(群)	合计
2009 年	6.43	1.26	141.30	191.02	340.01
2018 年	22.47	10.46	293.57	241.59	568.09

根据赵玉灵^[47]的研究和 2009—2018 年地质灾害分布情况,本文将地质灾害分为变好区、稳定区、变差区和新增灾害区 4 种情况,以分析多年来研究区地质灾害主要变化情况。

全区地质灾害变好区 11 处,面积为 8.04 hm²; 变差区 76 处,面积为 190.47 hm²; 稳定区 82 处,面积为 141.61 hm²; 新增灾害区 288 处,面积为

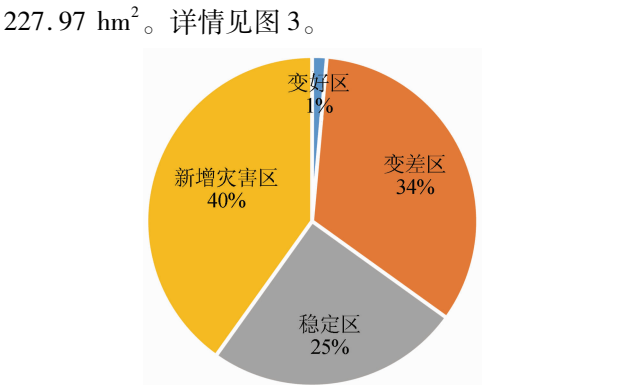


图 3 2009—2018 年地质灾害主要分布区变化情况统计

Fig.3 Statistics of changes in main distribution areas of geological disasters in 2009 and 2018

3.2 研究区地质灾害现状分析

3.2.1 地质灾害程度评估分析

根据地质灾害程度不同,将地质灾害分为特别严重、严重、较严重、一般 4 个等级。经过相关数据分析,共确定特别严重区 19 处,面积为 172.40 hm²; 严重区域 153 处,面积为 195.74 hm²; 较严重区域 189 处,面积为 137.91 hm²; 一般区域 96 处,面积为 62.04 hm²。具体情况见表 3。

表 3 地质灾害严重程度统计

Tab.3 Statistics of severity of geological disasters (处/hm²)

灾害程度	塌陷坑(群)	地裂缝(群)	有隐患滑坡	滑塌(群)	合计
特别严重	1/0.41	—	2/1.22	16/170.77	19/172.40
严重	3/4.42	2/4.30	132/142.25	16/44.77	153/195.74
较严重	8/8.15	7/4.69	169/105.01	5/20.06	189/137.91
一般	10/9.49	4/1.47	79/45.09	3/5.99	96/62.04
合计	22/22.47	13/10.46	382/293.57	40/241.59	457/568.09

根据贵州六盘水市盘县的灾害分布情况,圈定了 4 个地质灾害集中区(图 4),主要地质灾害基本

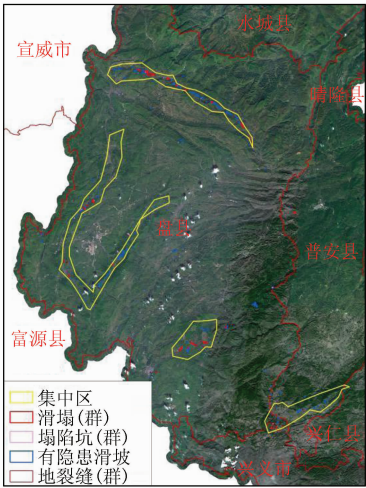


图 4 研究区矿山地质灾害集中区分布

Fig.4 Distribution of concentration area of mine geological disaster in the study area

都在地质灾害集中区内。地质灾害集中区的划分便于矿山地质灾害日后有效治理与适当防护。通过统计分析,矿业权内共有地质灾害 473 处,面积为 695.47 hm²(部分地质灾害区横跨多个矿区重复计算)。其中,塌陷坑(群) 17 处,面积为 18.62 hm²; 地裂缝(群) 13 处,面积为 10.27 hm²; 有隐患的滑坡 396 处,面积为 389.22 hm²; 滑塌(群) 47 处,面积为 389.22 hm²。

3.2.2 地质灾害损毁程度及典型分析

地质灾害造成了土地的严重损毁,毁损面积最大的为林地和耕地,共有地质灾害 193 处,面积为 333.55 hm²,占灾害区域 58.7%; 其次为其他地类,共有地质灾害 256 处,面积为 230.33 hm²,占灾害区域 40.5%; 最少的为草地,共有地质灾害 8 处,面积为 4.21 hm²,占灾害区域 0.8%。各地类损毁情况见表 4。

表 4 地质灾害造成了损毁情况统计

Tab. 4 Statistics of damage caused by geological disasters (处/hm²)

被损毁地类	塌陷坑(群)	地裂缝(群)	有隐患滑坡	滑塌(群)	合计
其他地类	18/20.22	8/3.91	223/165.03	7/41.17	256/230.33
草地	1/0.94	—	7/3.27	—	8/4.21
林地及耕地	3/1.31	5/6.54	152/125.28	33/200.42	193/333.55
合计	22/22.47	13/10.45	382/293.58	40/241.59	457/568.09

3.2.3 地质灾害威胁区域统计分析

目标区域矿山地质各类灾害对广大人民的生产生活造成极大威胁。经过统计分析,盘县地质灾害区域共有潜在隐患威胁区域 360 处,面积为 506.36 hm²。其中,对道路威胁 126 处,面积为 110.04 hm²;对果园威胁 2 处,面积为 0.75 hm²;对建筑物威胁 77

处,面积为 70.87 hm²;对城镇威胁 12 处,面积为 72.16 hm²;对村庄威胁 78 处,面积为 145.90 hm²;对煤矿威胁 50 处,面积为 92.48 hm²;对水库威胁 2 处,面积为 3.70 hm²;对水系威胁 7 处,面积为 5.91 hm²;对煤矿中转场地威胁 6 处,面积为 4.55 hm²。详情见表 5。

表 5 地质灾害威胁面积统计

Tab. 5 Statistics of areas of geological hazard threat (hm²)

地灾隐患类型	道路	果园	建筑物	城镇	村庄	煤矿	水库	水系	煤矿中转场地	合计
滑塌(群)	21.19	0	8.71	64.50	88.51	50.84	0	0	0	233.75
有隐患滑坡	79.46	0.75	60.66	6.58	55.74	41.33	3.70	5.91	4.34	258.47
地裂缝(群)	1.72	0	0.76	0	0.62	0.31	0	0	0.21	3.62
塌陷坑(群)	7.67	0	0.74	1.08	1.03	0	0	0	0	10.52
合计	110.04	0.75	70.87	72.16	145.90	92.48	3.70	5.91	4.55	506.36

3.3 研究区地质灾害成因分析和应对方法

3.3.1 地质灾害成因分析

1)从研究区所处地质环境角度分析。研究区整体处于山区红土地带,由于长期雨水天气,红土遭受长期风化侵蚀,疏松透水,成为理想的滑坡(滑塌、崩塌)物源。对照滑坡的 5 个基本特征不难看出,尽管黔西南山原地带为典型的黏粉质红土区,为滑坡和滑塌等地质灾害中等或弱发育区;但如果外力作用,灾害发生的可能性则会大大增加。这应该是研究区里采煤区域灾害集中而其他区域灾害较少发生的根本原因。

2)从研究区矿山开采方式角度分析。据相关统计,因地下开采诱发的地质灾害数量是露天开采的 6 倍。前者引发的灾害种类较多,后者则以滑塌和滑坡为主。这是因为矿山在地下开采过程中,破坏了围岩原有的应力平衡,在应力重布、达到新的平衡过程中,地面会产生变形。这种变形发生在平原地区,形成塌陷盆地、漏斗状塌陷坑和地裂缝等;发生在山区,可使山体结构发生变化,造成山体垮塌、滑坡、滑塌、地裂缝和塌陷坑等灾害。地质灾害的发生是有先后顺序的:地下开采矿山,最早的地面变形为地面塌陷和地裂缝;其次是由上述灾害诱发的山体开裂,开裂到一定程度便进一步发展成滑塌和滑坡灾害。毋庸置疑,在黔西南山原地带这样的生态环境脆弱区,高强度的煤矿地下开采是灾害多发的主要原因。

3.3.2 地质灾害应对方法

针对研究区的地质灾害特点,采取不同的地质灾害应对方法:

1)加强源头防范。在矿山设计准备阶段,进行矿山地质环境影响评价;在设计阶段,必须有地质环境保护和地质灾害防治篇章,利用高科技技术,针对性地提出保护地质环境的开采方式、方法和选冶工艺等;在生产阶段,加强管理,规范矿业活动,及时采取防止或减少地质灾害发生的措施。

2)加强矿山地质灾害的调查、监测、评估、防治和预测等工作,建立矿山地质灾害监测网络。遥感是目前大范围监测的最佳手段。

3)加强治理。采煤区的地表下沉过程是动态的,一般可分为初始期、活跃期、衰退期、稳定期。除对于严重影响人们生活的灾害要立刻治理外,其余灾害在变形处于衰退期或稳定期时进行治理。

4 结论

本文以位于黔西南六盘水市煤矿开采集中区为研究区,利用 2018 年获取的高空间分辨率国产卫星遥感影像及 2009 年以来历史遥感影像,结合采矿权、历史地质环境资料,开展黔西南山原地区煤矿地质灾害遥感动态监测技术方法研究。目标主要是为了分析研究黔西南地区煤矿地质灾害主要类型、不同灾害在高空间分辨率遥感影像上的表现特征、不

同空间分辨率遥感数据源在灾害监测中的应用能力、地质灾害分布特点以及与煤矿开采的相关程度、黔西南山原地区煤矿地质灾害信息提取及评价方法。通过研究,总结出一套针对黔西南山原地区独特自然条件的矿山地质灾害遥感监测方法,为类似地区矿山地质灾害的遥感监测提供借鉴。主要结论如下:

1)通过对 2009—2018 年研究区遥感影像数据对比,经统计分析发现,研究区 2009 年共有地质灾害 168 处,面积为 340.01 hm²;到 2018 年扩大了 167%,共有地质灾害 457 处,面积为 568.09 hm²。研究区内 2009—2018 年新增灾害地质区域占比 40%、变差区域占比 34%,说明该地区由于多年采矿活动使当地生态环境和地质灾害情况明显恶化,需引起当地有关部门高度警戒。

2)基于遥感技术对研究区的地质灾害现状进行深入分析和评估,发现研究区有 153 处严重地质灾害区域和 189 处较严重地质灾害区域。研究区内的地质灾害造成了土地的严重损毁,毁损面积最大的为林地和耕地,共有 193 处,面积共约 333.55 hm²。研究区内共有潜在隐患威胁区域 360 处,面积为 506.36 hm²;其中对道路威胁数量最多,共有 126 处,面积为 110.04 hm²。本文的研究结果可为当地进行生态环境修复和矿山地质灾害治理提供可靠参考数据和重要研究思路。

3)分析研究区内地质灾害成因,根据地质灾害集中区域与研究区内采矿区域的高度一致性,分析判断在黔西南山原地带这样的生态环境脆弱区,高强度的煤矿地下开采是灾害多发的主要原因。因此,要通过多种手段,在源头防范矿山地质灾害;加强矿山地质灾害的调查、监测、评估、防治和预测等工作,建立一套有效的矿山地质灾害监测网络;通过科学的方法有效治理矿山地质灾害及其次生灾害。

参考文献 (References):

[1] 国土资源部. DZ/T0223—2011 矿山地质环境保护与恢复治理方案编制规范[S]. 北京:国土资源部地质环境司,2011.
Ministry of Land and Resources. DZ/T0223—2011 mine geological environmental protection and restoration and control plan preparation specifications[S]. Beijing: Department of Geology and Environment, Ministry of Land and Resources, 2011.

[2] 高俊华,刘莎莎,杨金中,等. 基于遥感的露天煤矿集中区地质环境灰关联评价——以准格尔煤田为例[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(3): 183–190. doi:10.6046/gtzyyg. 2020006.
Gao J H, Liu S S, Yang J Z, et al. Gray correlation evaluation of geological environment in the open-pit coal mine concentration area based on remote sensing: A case study of the Zhungeer Coalfield [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(3): 183–

190. doi:10.6046/gtzyyg. 2020006.

[3] 王晓红,荆青青,周英杰,等. 山东省采煤沉陷遥感动态监测[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(3): 203–210. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 03. 30.
Wang X H, Jing Q Q, Zhou Y J, et al. Remote sensing dynamic monitoring of coal mine subsidence disaster in Shandong Province [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(3): 203–210. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. 03. 30.

[4] 牛威. 煤矿采空塌陷导致土地破坏状况及危害[J]. 华北国土资源, 2007(1): 49–50, 55.
Niu W. Land destruction and damage caused by coal mining collapse[J]. Huabei Land and Resources, 2007(1): 49–50, 55.

[5] 高清武,牛景才. 煤田采空沉陷及其影响因素分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(3): 57–61.
Gao Q W, Niu J C. The coalfield exploitation subsidence and analyses on its effective factors[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1997, 8(3): 57–61.

[6] 李成尊,聂洪峰,汪 劲,等. 矿山地质灾害特征遥感研究[J]. 国土资源遥感, 2005, 17(1): 45–48, 78. doi:10.6046/gtzyyg. 2005. 01. 11.
Li C Z, Nie H F, Wang J, et al. Remote sensing study on mine geological disaster characteristics[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2005, 17(1): 45–48, 78. doi:10.6046/gtzyyg. 2005. 01. 11.

[7] 杜培军,陈云浩,曹金亮,等. 煤矿区地质环境与地质灾害遥感集成监测系统的关键技术[J]. 地理信息世界, 2008, 10(5): 14–20.
Du P J, Chen Y H, Cao J L, et al. The key technology of remote sensing integrated monitoring system of geological environment and geological disaster in coal mine area[J]. Geomatics World, 2008, 10(5): 14–20.

[8] 徐 刚,郑达兴,李述靖,等. 黄土高原西南部陇县一千阳一带崩塌、滑坡地质灾害的遥感影像特征及分布规律[J]. 地质通报, 2008, 27(11): 1837–1845.
Xu G, Zheng D X, Li S J, et al. Remote sensing images and distribution characteristics of avalanche and landslide geohazards in the western part of the Weibei Plateau, Shaanxi Province, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(11): 1837–1845.

[9] 冯雨林,陈 江,姜琦刚,等. 3D 遥感影像模型在古乡沟泥石流地质灾害预警中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(3): 114–119.
Feng Y L, Chen J, Jing Q G, et al. The application of 3D remote sensing image model of debris flow disaster warning in Gu-xiang gully, Tibet[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, 20(3): 114–119.

[10] 宁树正,万余庆,孙顺新. 煤矿区沉降与遥感监测方法探讨[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(1): 10–12.
Ning S Z, Wang Y Q, Sun S X. A discussion of coal mining area subsidence and remote sensing monitoring[J]. Coal Geology of China, 2008, 20(1): 10–12.

[11] 濮国梁,杨武年,刘汉超. 正射遥感影像地图制作技术在岷江上游滑坡研究中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(3): 312–317.
Pu G L, Yang W N, Liu H C. Applications of orthophoto map of landsat TM to the study of cracks and landslides on upper reaches

- of the Minjiang River[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2000, 27(3): 312–317.
- [12] 顾广明, 王丽, 蒋德林, 等. 3S 技术在煤矿区开发现状及环境监测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(5): 51–55.
Gu G M, Wang L, Jiang D L, et al. Application of 3S technology to monitoring development and environment conditions in coal mine area[J]. Coal Geology and Exploration, 2006, 34(5): 51–55.
- [13] 尚红英, 陈建平, 李成尊, 等. RS 在矿山动态监测中的应用——以新疆稀有金属矿集区为例[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(2): 189–195.
Shang H Y, Chen J P, Li C Z, et al. Application of remote sensing in the dynamic inspection of the mining: An example in the rare metal ore concentration area of Xinjiang[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(2): 189–195.
- [14] 乔彦肖, 李密文, 张维宸. 基于遥感技术支持的地质灾害及孕灾环境综合评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(4): 83–87.
Qiao Y X, Li M W, Zhang W C. Comprehensive evaluation on geological hazards and the environment of developing geological hazards in the northwest Hebei on the basis of RS[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(4): 83–87.
- [15] 王钦军, 陈玉, 蔺启忠, 等. 矿山地质灾害遥感监测方法及成因分析——以北京房山区史家营煤矿为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 75–79.
Wang Q J, Chen Y, Lin Q Z, et al. Remote sensing monitoring method and cause analysis of mine geological disaster: Take Shijaying coal mine in Fangshan District, Beijing as an example[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(1): 75–79.
- [16] 何国清, 杨伦, 凌庚娣, 等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991.
He G Q, Yang L, Ling G D, et al. Mining subsidence theory[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Publisher, 1991.
- [17] 沙永莲, 王晓文, 刘国祥, 等. 基于 SBAS InSAR 的新疆哈密砂墩子煤田开采沉陷监测与反演[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 194–201. doi:10.6046/zrzyyg.2020026.
Sha Y L, Wang X W, Liu G X, et al. SBAS – In SAR – based monitoring and inversion of surface subsidence of the Shadunzi coal mine in Hami City, Xinjiang[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(3): 194–201. doi:10.6046/zrzyyg.2020026.
- [18] 桑潇, 张成业, 李军, 等. 煤炭开采背景下的伊金霍洛旗土地利用变化强度分析[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 148–155. doi:10.6046/zrzyyg.2020358.
Sang X, Zhang C Y, Li J, et al. Application of intensity analysis theory in the land use change in Yijin Holo Banner under the background of coal mining[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(3): 148–155. doi:10.6046/zrzyyg.2020358.
- [19] 杨显华, 黄洁, 田立, 等. 矿山遥感监测在采空区稳定性分析中的应用[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(3): 143–150. doi:10.6046/gtzyyg.2018.03.20.
Yang X H, Huang J, Tian L, et al. Application of mine remote sensing monitoring to analysis of mine goaf stability[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(3): 143–150. doi:10.6046/gtzyyg.2018.03.20.
- [20] 易同生, 高为. 六盘水煤田上二叠统煤系气成藏特征及共探共采方向[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1553–1564.
Yi T S, Gao W. Reservoir formation characteristics as well as co – exploration and co – mining orientation of Upper Permian coal – bearing gas in Liupanshui coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1553–1564.
- [21] 吴财芳, 刘小磊, 张莎莎. 滇东黔西多煤层地区煤层气“层次递阶”地质选区指标体系构建[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1647–1653.
Wu C F, Liu X L, Zhang S S. Construction of “hierarchical” geological selection index system for coalbed methane in multi coal seam areas of eastern Yunnan and western Guizhou[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1647–1653.
- [22] 高为, 田维江, 秦文, 等. 贵州省煤层气与页岩气共探共采的地质优选[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 36–38.
Gao W, Tian W J, Qin W, et al. Geological optimization of coalbed methane and shale gas co – exploration and concurrent production in Guizhou Province[J]. Fault – Block Oil and Gas Field, 2014, 21(1): 36–38.
- [23] 迟焕鹏, 毕彩芹, 单衍胜, 等. 黔西都格井田煤层气储层特征及可采性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(12): 3447–3452.
Chi H P, Bi C Q, Shan Y S, et al. Reservoir characteristics and recoverability of CBM resource in Duge coalfield of western Guizhou[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12): 3447–3452.
- [24] 高为, 易同生, 金军, 等. 黔西地区煤样孔隙综合分形特征及对孔渗性的影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1258–1265.
Gao W, Yi T S, Jin J, et al. Pore integrated fractal characteristics of coal sample in western Guizhou and its impact to porosity and permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1258–1265.
- [25] 高为, 易同生. 黔西松河井田煤储层孔隙特征及对渗透性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(2): 55–61.
Gao W, Yi T S. Pore features of coal reservoir in Song – he mine field of west Guizhou and its impact to permeability[J]. Coal Science and Echnology, 2016, 44(2): 55–61.
- [26] 高为, 韩忠勤, 吕放, 等. 六盘水地区煤层含气性地质特征及差异成因[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(11): 122–130.
Gao W, Han Z Q, Lyu F, et al. Geological characteristics of gas in coal seam and cause of difference in Liupanshui area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 122–130.
- [27] 陈玲, 贾佳, 王海庆. 高分遥感在自然资源调查中的应用综述[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 1–7. doi:10.6046/gtzyyg.2019.01.01.
Chen L, Jia J, Wang H Q. An overview of applying high resolution remote sensing to land and resources survey[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(1): 1–7. doi:10.6046/gtzyyg.2019.01.01.
- [28] 郑雄伟, 彭学, 尚坤. 基于国产卫星的遥感地质解译能力评估[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 1–10. doi:10.6046/zrzyyg.2020357.
Zheng X W, Peng B, Shang K. Assessment of the interpretation ability of domestic satellites in geological remote sensing[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(3): 1–10. doi:10.6046/zrzyyg.2020357.

- [29] 中国地质调查局. 滑坡崩塌泥石流灾害调查规范(1:50 000): DD2008-02[S]. 北京:中国地质调查局,2008:9-15.
China Geological Survey. Code for investigation of landslide, collapse and debris flow disasters(1:50 000): DD2008-02[S]. Beijing:China Geological Survey,2008:9-15.
- [30] 童立强,郭兆成. 典型滑坡遥感影像特征研究[J]. 国土资源遥感,2013,25(1):86-92. doi:10.6046/gtzyyg.2013.01.16.
Tong L Q,Guo Z C. Study on remote sensing image characteristics of typical landslide[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2013,25(1):86-92. doi:10.6046/gtzyyg.2013.01.16.
- [31] 张志军,李有三,祁万强,等. 基于 GF-2 数据的 G314 沿线奥—塔段地质灾害遥感调查[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(9):1249-1257.
Zhang Z J,Li Y S,Qi W Q,et al. Investigation and evaluation of geological hazards using GF-2 remote sensing technology in Aoyitang-Taheman section of highway G314[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science),2021,44(9):1249-1257.
- [32] 王庆雅,张锦. 高分辨率遥感影像滑坡纹理特征提取方法[J]. 太原理工大学学报,2021,52(4):547-556.
Wang Q Y,Zhang J. Landslide texture feature extraction method from high resolution remote sensing images[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2021,52(4):547-556.
- [33] 王晓文,刘巧,张波,等. 近40 a 昆仑山口37号冰川冰舌滑塌多源遥感监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(11):1687-1696.
Wang X W,Liu Q,Zhang B,et al. Multi-source remote sensing monitoring and analysis of glacier tongue slide in Kunlun Mountain Pass in recent 40 years[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2020,45(11):1687-1696.
- [34] 侯恩科,张杰,谢晓深,等. 无人机遥感与卫星遥感在采煤地表裂缝识别中的对比[J]. 地质通报,2019,38(s1):261-266.
Hou E K,Zhang J,Xie X S,et al. Comparison of UAV remote sensing and satellite remote sensing in coal mining surface crack identification[J]. Geological Bulletin of China,2019,38(s1):261-266.
- [35] 王娅娟,孟淑英,李军,等. 地裂缝信息遥感提取方法研究[J]. 神华科技,2011(5):31-33,39.
Wang Y J,Meng S Y,Li J,et al. Research on remote sensing extraction method of ground fracture information[J]. Shenhua Technology,2011(5):31-33,39.
- [36] 魏长婧,汪云甲,王坚,等. 无人机影像提取矿区地裂缝信息技术研究[J]. 金属矿山,2012,41(10):90-92.
Wei C J,Wang Y J,Wang J,et al. Research on information technology of ground fracture extraction from mining area by UAV image[J]. Metal Mine,2012,41(10):90-92.
- [37] 韦博文,刘国祥,汪致恒. 基于改进的 MF-FOG 算法和无人机影像提取黄土地区地裂缝[J]. 测绘,2018,41(2):51-56,61.
Wei B W,Liu G X,Wang Z H. Based on improved MF-FOG algorithm and UAV image extraction of ground fractures in loess region[J]. Surveying and Mapping,2018,41(2):51-56,61.
- [38] 张兴航,朱琳,王威,等. 基于对象的地裂缝分步提取方法研究与应用[J]. 国土资源遥感,2019,31(1):87-94. doi:10.6046/gtzyyg.2019.01.12.
Zhang X H,Zhu L,Wang W,et al. Research and application of object-based step extraction method for ground fracture[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2019,31(1):87-94. doi:10.6046/gtzyyg.2019.01.12.
- [39] 杨豪杰,张锦. 矿区采空地裂缝高分辨率影像特征分析[J]. 地理信息世界,2020,27(6):57-63.
Yang H J,Zhang J. Analysis of high resolution image characteristics of mining ground fracture[J]. Geomatics World,2020,27(6):57-63.
- [40] 张敦虎,卢中正,强建华,等. 地面塌陷特征及其遥感识别方法研究[J]. 地质灾害与环境保护,2009,20(3):8-12.
Zhang D H,Lu Z Z,Qiang J H,et al. Study on the characteristics of ground collapse and its remote sensing recognition method[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,2009,20(3):8-12.
- [41] 杨圣军,赵燕,吴泉源,等. 高分辨率遥感图像中采矿塌陷地的提取——以龙口矿区为例[J]. 地域研究与开发,2006,25(4):120-124.
Yang S J,Zhao Y,Wu Q Y,et al. Mining subsidence extraction from high resolution remote sensing images:Take Longkou mining area as an example[J]. Areal Research and Development,2006,25(4):120-124.
- [42] 孙超. 地下采空区对地表稳定性的影响[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2005.
Sun C. Influence of underground goaf on surface stability[D]. Harbin:Institute of Engineering Mechanics,China Seismological Bureau,2005.
- [43] 黎来福,王秀丽. SPOT-5 卫星遥感数据在煤矿塌陷区监测中的应用[J]. 矿山测量,2008(2):45-47.
Li L F,Wang X L. Application of SPOT-5 satellite remote sensing data in coal mine subsidence area monitoring[J]. Mine Surveying,2008(2):45-47.
- [44] 许长辉,高井祥,王坚,等. 多源多时相遥感数据融合在煤矿塌陷地中应用研究[J]. 水土保持研究,2008,15(1):92-96.
Xu C H,Gao J X,Wang J,et al. Application research of multi-source multi-temporal remote sensing data fusion in coal mine subsidence[J]. Research of Soil and Water Conservation,2008,15(1):92-96.
- [45] 杜培军,郭达志. GIS 支持下遥感图像中采矿塌陷地提取方法研究[J]. 中国图象图形学报,2003,8(2):231-235.
Du P J,Guo D Z. Research on mining subsidence extraction method from remote sensing image supported by GIS[J]. Journal of Image and Graphics,2003,8(2):231-235.
- [46] 余学义,施文刚. 地表剩余沉陷的预计方法[J]. 西安矿业学院学报,1996(1):1-4,27.
Yu X Y,Shi W G. Methods for predicting residual surface subsidence[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,1996(1):1-4,27.
- [47] 赵玉灵. 基于层次分析法的矿山环境评价方法研究——以海南岛为例[J]. 国土资源遥感,2020,32(1):148-153. doi:10.6046/gtzyyg.2020.01.20.
Zhao Y L. Study and application of analytic hierarchy process of mine geological environment:A case study in Hainan Island[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2020,32(1):148-153. doi:10.6046/gtzyyg.2020.01.20.

High – resolution remote sensing – based dynamic monitoring of coal mine collapse areas in southwestern Guizhou: A case study of coal mine collapse areas in Liupanshui City

YU Hang, AN Na, WANG Jie, XING Yu, XU Wenjia, BU Fan, WANG Xiaohong, YANG Jinzhong
(China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Southwestern China suffers frequent geological disasters. The exploitation of mineral resources in southwestern China is highly liable to induce geological disasters and related secondary disasters. This study investigated the remote sensing – based dynamic monitoring technology for coal mine collapse areas in the coal mining concentration areas in Liupanshui City, Guizhou Province. Based on the high – resolution remote sensing images, this study established remote sensing geological interpretation symbols of coal mine collapse areas in the mountainous plateau of southwestern Guizhou and then dynamically monitored the geological disasters in Liupanshui from 2009 to 2018. Moreover, this study analyzed the present geological disasters in the study area. The remote sensing interpretation revealed that geological disasters in the study area were significantly aggravated over the years. Compared with 2009, 2018 witnessed an increase of 167% in the geological disasters, including 40% of new geological disaster areas and 34% of areas with deteriorated geological disasters. According to the geological disaster degrees in the study area, this study identified four geological disaster concentration areas, which were highly consistent with the mining concentration areas in the study area. Based on the remote sensing data, this study analyzed the types of land damaged by geological disasters in mines and investigated possible resulting damage to the people and the ecological environment in the study area. The results show that disasters that severely damaged land caused the largest damage area for forest and cultivated lands, which had a total number of 193 and a total area of about 333.55 hm². There are 360 areas with potential hazards in the study area, covering an area of 506.36 hm². They are dominated by 126 threats to roads, which cover an area of 110.04 hm². The results of this study can provide a reliable data reference and a critical research approach for restoring the local ecological environment and controlling geological disasters in mines. Moreover, based on the characteristics of the study area, this study further analyzed the causes of the geological disasters in mines, explored the geological disaster control schemes, and proposed countermeasures and suggestions.

Keywords: Liupanshui City; geological disasters in mines; remote sensing monitoring; coal mine collapse area
(责任编辑: 李 瑜)