

杨妍妨, 居和建, 程洋, 等. 地质灾害隐患早期识别中的地质环境条件遥感解译及应用——以华坪县为例[J]. 中国岩溶, 2024, 43(6): 1362-1375.

DOI: 10.11932/karst20240613

地质灾害隐患早期识别中的地质环境条件 遥感解译及应用 ——以华坪县为例

杨妍妨^{1,2}, 居和建³, 程洋^{1,2}, 王永^{1,2}, 阎书豪⁴, 王珊珊⁴, 李芹^{5,6,7}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西桂林 541004; 2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西平果 531406; 3. 南宁理工学院, 广西桂林 541004; 4. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 5. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室(筹), 云南昆明 650216; 6. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 云南昆明 650216; 7. 云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216)

摘要: 地质灾害隐患早期识别的主要任务是从实际的地质环境出发, 研判地质环境因素变化可能产生新的地质灾害, 对其进行科学预测以降低灾害发生几率。文章在实践工作基础上, 结合已有规范、标准, 构建由地形地貌、地质构造、地层岩性、水文地质、土地利用、人类活动、不良地质现象7类地质环境条件组成、服务于地质灾害隐患早期识别工作的县域地质环境遥感解译体系, 并利用北京二号高分辨率光学遥感影像建立地质环境条件全要素解译标志, 完成县域环境地质遥感解译。基于县域地质环境解译结果, 总结归纳采用7类地质环境要素解译研判单体隐患的工作内容及步骤, 并以云南省丽江市华坪县八德村滑坡隐患为示范案例, 展示地质环境遥感解译工作如何服务于单体地质灾害隐患早期识别与风险评价。

关键词: 地质环境; 遥感; 解译标志; 八德村滑坡隐患; 早期识别

创新点: 构建了县域地质灾害隐患地质环境遥感解译体系, 并对其如何服务于华坪县单体地质灾害隐患早期识别与风险评价做出示范性展示。

中图分类号: P694; P237 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2024)06-1362-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

中国山地丘陵区地质环境条件复杂, 地质灾害点多面广、防范难度大, 是世界上地质灾害最严重、受威胁人口最多的国家之一, 地质灾害防治形势十分严峻^[1-3]。近年来, 以四川茂县新磨村滑坡、重庆

武隆鸡尾山崩滑为代表的重大地质灾害多次发生, 呈现出隐蔽性强、突发性高、破坏力大的特点^[4], 传统手段很难发现此类灾害隐患。

遥感技术的出现使我们拥有了便捷获取此类灾害隐患信息的能力^[5-8]。通过利用不同类型的传感器(如 SAR、LiDAR 等)、不同类型的信息获取平台(如

基金项目: 国家自然科学基金项目(U21A2041); 中国地质调查局项目(DD20230441); 广西重点研发计划项目(2020AB22013)

第一作者简介: 杨妍妨(1992—), 女, 硕士, 工程师, 从事岩溶地质探测技术研究与应用工作。E-mail: yangyanfang@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 程洋(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事遥感地质工作。E-mail: chengyang@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2024-01-01

卫星、航空、无人机与地面观测),可对灾害隐患进行有效识别、监测及灾后应急调查^[4,9]。2017年以来,殷跃平、许强等著名地质灾害专家提出了面向重大地质灾害隐患早期识别的“三查”技术体系^[10-11],葛大庆等^[4]则从综合遥感测量的角度提出了地质灾害隐患识别的“三形”观测内容,相关部门也相继出台了地质灾害遥感调查等技术要求、规范^[12-15],不少学者将遥感技术应用于地质灾害的早期识别和监测中,取得良好效果。Rosi等^[16]基于雷达遥感技术,获取了托斯卡纳地区滑坡的分布和地貌特征;Dong等^[17]利用InSAR技术检测了流域尺度潜在不稳定斜坡,并划定滑动边界、测量主要滑坡变形;陈立权等^[18]则采用多期光学遥感数据,对贵州发耳镇尖山营滑坡进行了长时序定量化二维形变监测,获取其累计形变量;付豪等^[19]综合雷达与光学遥感技术,实现丹巴县活动滑坡隐患的广域“普查”,识别滑坡隐患41处。

这些研究促进了遥感技术在地灾方面的应用,但是仅依靠遥感解译结果就判定地灾隐患是不够的,还需要从灾害本身出发,结合孕灾背景和灾害发育结构等进行分析,以此来提高识别精度^[20-21]。许强等^[22]认为地质灾害最容易发生在地质环境脆弱的区域和稳定性相对较差的斜坡部位,这些区域和部位就是需重点关注的潜在地质灾害隐患区;刘传正^[23]认为,地质灾害早期识别的主要任务是研判地质环境因素变化可能产生新的地质灾害,而不是识别出历史上是否发生过地质灾害。这就要求地质人员基于实际地质环境条件,全面掌握灾害的孕灾背景和发生规律,提高隐患判别准确率^[24-25]。

基于此,文章以云南省华坪县为例,开展地质灾害隐患早期识别中的地质环境条件遥感解译及应用研究,构建县域地质灾害隐患地质环境遥感解译体系,将遥感解译成果服务于单体地质灾害隐患早期识别与风险评价中,以期对地质灾害精细化调查与风险评价工作提供基础遥感资料和参考依据,提高

地质灾害隐患早期识别的准确率。

1 研究区概况

华坪县隶属于云南省丽江市,位于云贵高原与青藏高原接壤的崇山峻岭之地,总体地势北西高、南东低,最高海拔3 198 m,最低海拔1 015 m,相对高差2 183 m。上新世以来新构造运动强烈,大面积间歇性隆起造成河谷下切,使得境内山高谷深,山峦跌宕起伏,为地质灾害的形成提供了有利条件。随着经济的发展,矿山开采、公路交通、水利水电建设项目日益增多,区内森林、植被等生态环境、斜坡微地貌等不同程度遭受破坏,加剧或诱发了地质灾害的发生。

已有地质灾害调查显示,华坪县各类地质灾害总数为257处,其中隐患点230处,类型主要为滑坡、崩塌、泥石流和地面塌陷(表1),具有点多面广、分布不均、局部集中等特点^[26]。其中,滑坡主要为土质现代滑坡,主要分布于乌木河、新庄河流域沿线地形宽缓的斜坡地带、岩性相对软弱的第四系松散堆积物较厚的河流及公路沿线;崩塌主要为岩质崩塌,集中在1 100~2 000 m高程之间的公路沿线、震旦系灯影组、泥盆系中统及三叠系大箐组的白云岩、灰岩及砂岩中;泥石流以松散堆积物泥石流为主,以新庄河支流鲤鱼河、腊么河、天星河及乌木河支流鱼必河、灰窝河等最为发育;地面塌陷按成因可分为采空塌陷和岩溶塌陷两类。

2 遥感数据来源

文章选用2021年1月30日时相、亚米级高分辨率的北京二号(BJ-2)卫星数据作为数据源(表2),经过正射校正、配准、融合、镶嵌、匀色等数字图像处理流程,生成色度均匀、反差适中、纹理清楚、镶嵌完整、满足空间精度要求的高分辨率遥感解译底

表1 华坪县地质灾害(隐患)情况

Table 1 Situation of geo-hazards (hidden dangers) in Huaping county

灾害类型	特大型	大型	中型	小型	合计	地质灾害类型所占百分比
滑坡	0	7	74	105	186	72.37%
泥石流	0	0	5	30	35	13.62%
崩塌	0	5	14	4	23	8.95%
地面塌陷	0	0	0	13	13	5.06%
合计	0	12	93	152	257	100.00%
规模所占百分比	0	4.67%	36.19%	59.14%	100.00%	

图, 并采用 B1、B2、B3(红、绿、蓝)的波段组合, 模拟自然真彩色, 可真实反映地表实际情况、有效开展区域地质环境条件解译工作。

3 地质环境遥感解译体系构建

3.1 理论依据

地质环境是人类社会发生发展过程中所依托的地球表层岩、土、水共生的地质系统^[24], 是地质灾害重要的孕灾要素, 如地形地貌是地质灾害形成的主控因素之一^[27], 构造活动对地质灾害的发育特征、空间展布等有着直接或间接的影响^[28], 土地利用^[29]和人类活动方式^[30]直接影响斜坡稳定性。通过遥感手段先行解译地形地貌、地层岩性、地质构造、土地利用、人类活动等区域地质环境条件, 全面分析灾害隐患的孕灾环境背景, 可辅助隐患早期识别, 提高效率 and 准确率。

3.2 标准与方法

以已有地质灾害调查、风险评估相关的技术规范^[12-15,31]为标准, 根据地质灾害隐患早期识别的工作目标和需求, 依据华坪县实际地质情况、已有灾害的发育特征, 梳理分类县域地质环境条件, 构建县域地质灾害隐患地质环境遥感解译体系。

3.3 体系构建

构建由地质灾害相关、由地形地貌、地质构造、地层岩性、水文地质、土地利用、人类活动及不良地质现象 7 个大类, 阶地、洼地、断层、背斜、碎屑岩、

碳酸盐岩、泉点、地下河出入口、岩溶塌陷、耕地、林地、水域、居民点、工矿用地、裸地、矿业开采、水电建设、城镇建设、公路建设、农耕垦殖、坡面侵蚀、活动冲沟 22 种要素组成的华坪县县域地质灾害隐患地质环境遥感解译体系(表 3), 并据此建立全要素遥感解译标志。

3.4 遥感解译方法

地质遥感解译的方法主要有直译法、追索法、类比法和综合分析法, 实际工作通常综合应用 4 种方法。具体步骤: (1)初步解译; (2)野外踏勘, 建立解译标志; (3)详细解译; (4)野外验证; (5)补充解译, 完善解译成果。地质环境遥感解译遵循地质遥感解译的方法和步骤, 同时结合地质环境实际对象进行解译。文章根据华坪县县域地质灾害隐患地质环境遥感解译体系, 建立全要素遥感解译标志, 完成区域地质环境条件解译。

3.5 遥感解译标志

3.5.1 地形地貌解译标志

地形地貌除了采用计算机自动提取的方法获取坡度、坡向信息以外, 基于北京二号光学遥感影像主要解译河流阶地、洼地等微地貌(图 1)。

(1)河流阶地: 分布在乌木河、新庄河等河流两岸, 呈不规则块状, 地势平坦, 多因人工耕种呈绿色、灰黄色色调, 边界清晰, 其光学影像特征明显;

(2)洼地: 长条状、圆形状等负地形, 四周高、中间低, 底部多为耕地, 岩溶洼地则通常与岩溶丘陵、

表 2 北京二号卫星数据主要参数

Table 2 Main parameters of Beijing-2 High-Resolution Optical Remote Sensing Images

卫星	国家	发射时间	全色分辨率	多光谱分辨率	重访周期	幅宽
北京二号	中国	2015.7.11	0.8 m	3.2 m	1~2 d	24 km

表 3 华坪县县域地质灾害隐患地质环境遥感解译体系

Table 3 Remote sensing interpretation system of geological environment conditions of potential geo-hazards in Huaping county

序号	地质环境解译大类	地质环境遥感解译要素
1	地形地貌	阶地、洼地
2	地质构造	断层、背斜
3	地层岩性	碎屑岩区—侏罗系下统冯家河组(J ₁ f)、碳酸盐岩区—震旦系上统灯影组(Z ₁ d)
4	水文地质	泉点、地下河出入口、岩溶塌陷
5	土地利用	耕地、林地、水域、居民点、工矿用地、裸地
6	人类活动	矿业开采、水电建设、城镇建设、公路建设、农耕垦殖
7	不良地质现象	坡面侵蚀、活动冲沟

岩溶峰丛组合出现。

3.5.2 地质构造解译标志

断层为地质灾害发育的主要控制条件之一，其在遥感影像上多沿沟谷向两侧延伸，延伸长度不等，沿走向方向可见断层崖、断层三角面；多处断层又为岩性界线，界线两侧呈现相异的地貌景观特征。背斜在影像上表现为线状，两侧地质景观相似，色调一

致，具有明显对称性(图 2)。

3.5.3 地层岩性解译标志

泥岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、钙质泥岩、泥质粉砂岩等岩体往往遇水软化甚至崩解，形成软弱结构面，有利于崩塌、滑坡、泥石流的形成。华坪县境内侏罗系下统冯家河组(J₁f)为地质灾害多发的软弱岩层，分布较为广泛，极易发生地质灾害，其主要岩性为暗紫

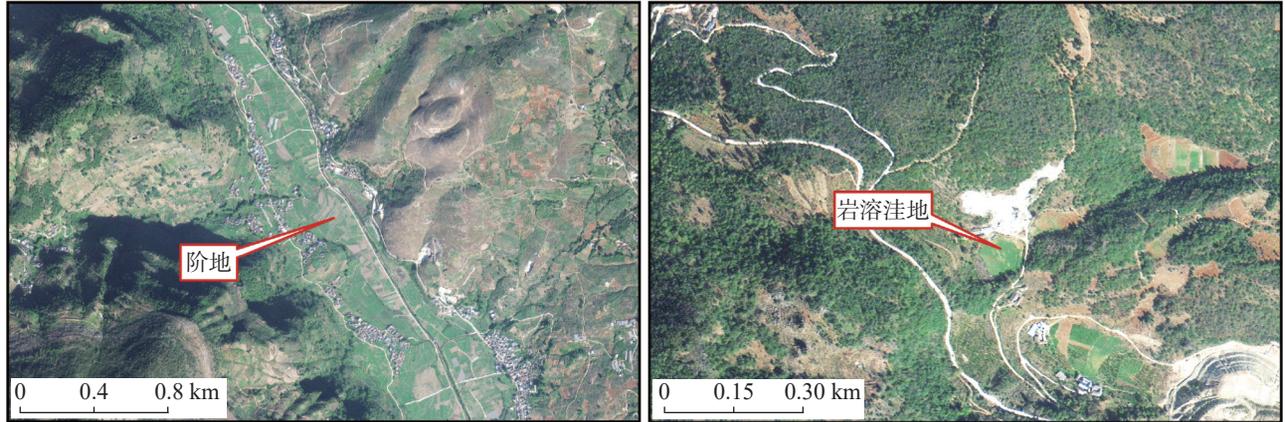


图 1 华坪县典型地形地貌遥感影像图

Fig. 1 Remote sensing images of typical landforms in Huaping county

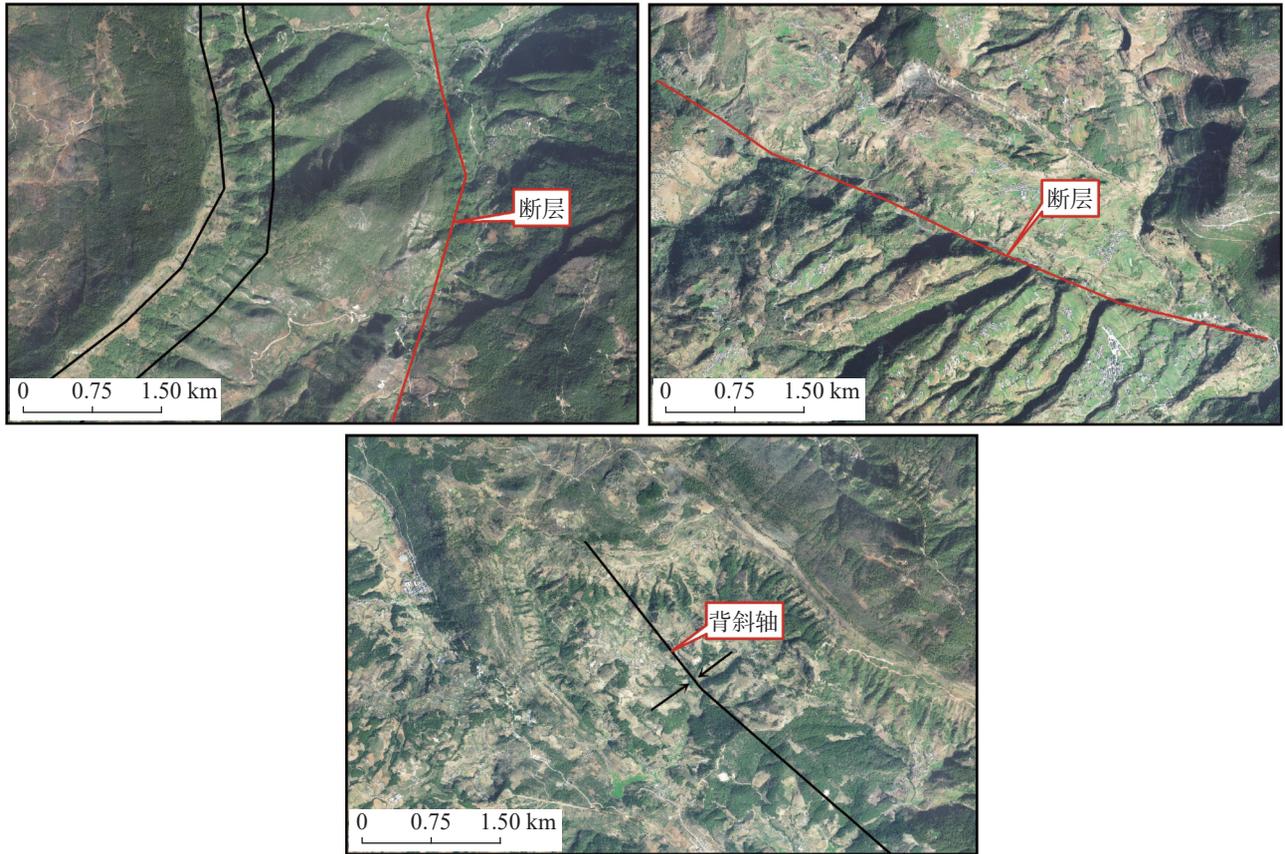


图 2 华坪县典型地质构造遥感影像图

Fig. 2 Remote sensing images of typical geological structures in Huaping county

红色砂岩,夹细粒石英砂岩,在遥感影像上呈深绿色、绿色色调,树枝状水系发育,山脊短小、较尖锐(图3)。

部分震旦系地层岩性属碳酸盐岩,多见不良地质现象。典型岩溶区以震旦系上统灯影组(Zbd)为例,主要岩性为灰白色厚层块状白云岩、白云质灰岩,属坚硬岩层,且为纯岩溶区,分布于县域西部、北部等,易发育不良地质现象,其呈褐绿色夹少量点状灰白色图斑,纹理粗糙,山脊平滑、山体圆润,植被低矮、

稀疏,光学影像特征明显。

3.5.4 水文地质解译标志

地下水活动,可软化岩、土,降低岩、土体的强度,在滑坡形成中起着主要作用,尤其是对滑面(带)的软化作用和降低强度的作用最突出^[30]。在岩溶区,地下水位的变化,也易产生岩溶塌陷等灾害^[31]。其主要水文地质现象解译如下(图4):

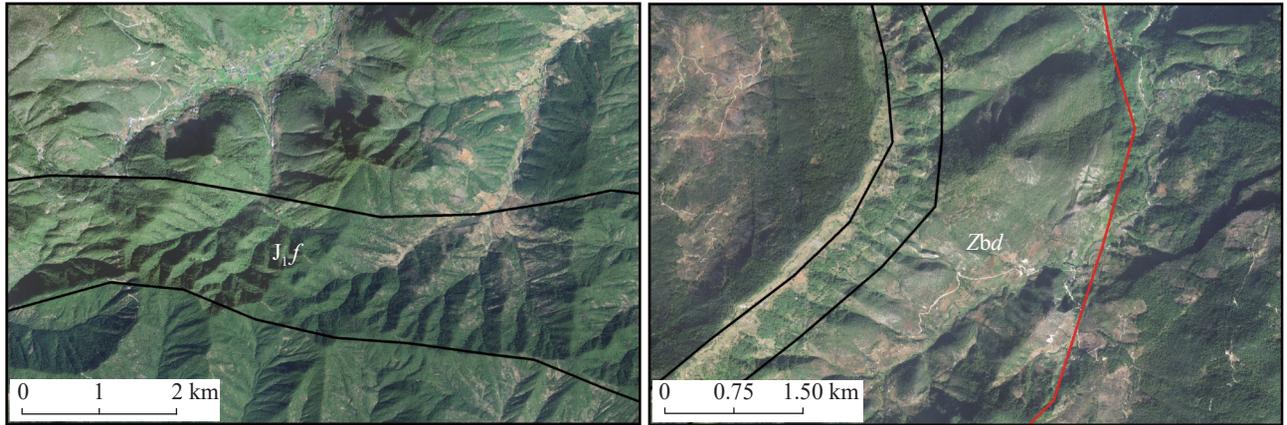


图3 华坪县典型地层岩性遥感影像图

Fig. 3 Remote sensing images of typical lithology in Huaping county

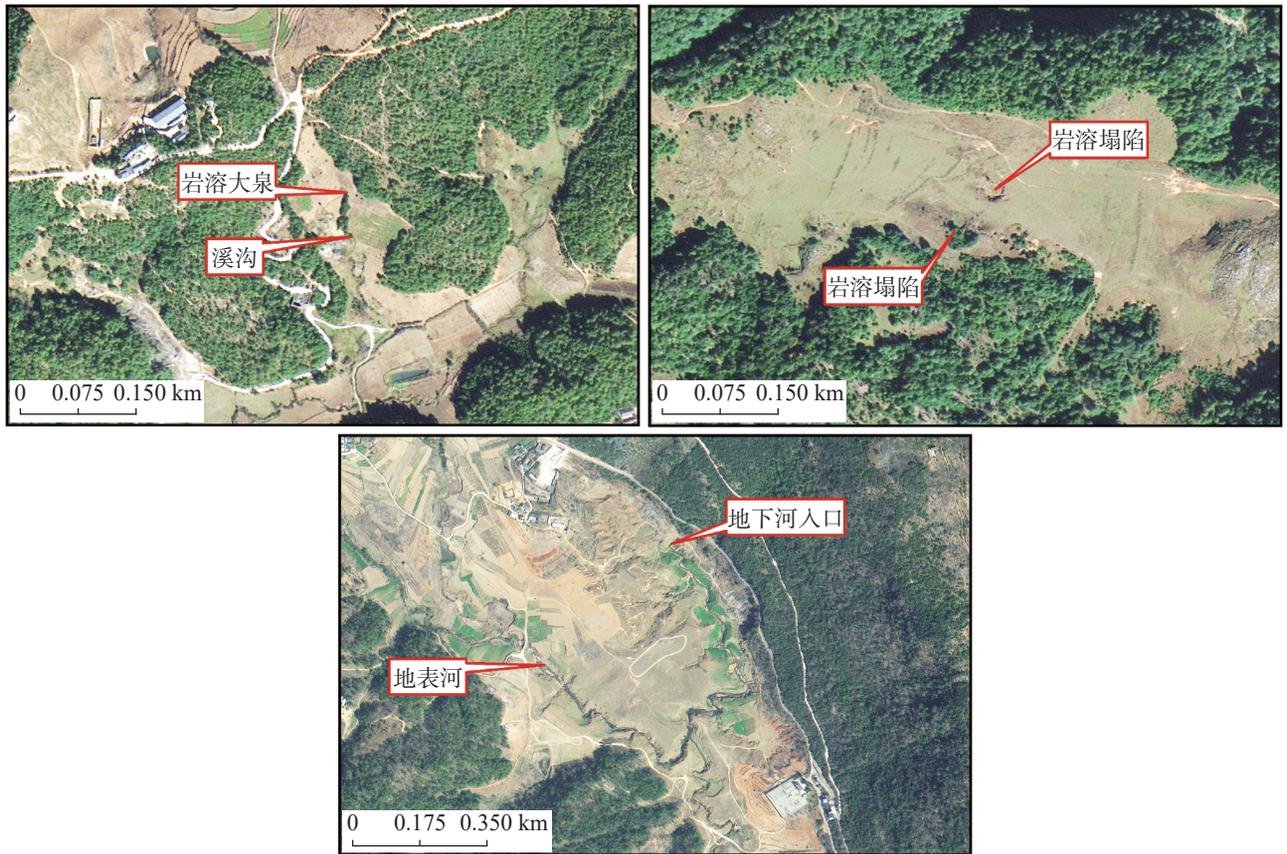


图4 华坪县典型水文地质遥感影像图

Fig. 4 Remote sensing images of typical hydrogeology in Huaping county

(1)泉：在遥感影像上一般发育于山体坡脚处，具有“泉+溪沟+植被茂盛”的典型影像组合特征，溪沟的源头就是泉点的位置，泉水从张裂隙中流出，形成明显的地表径流，沿溪沟有异常的植被茂盛；

(2)岩溶塌陷：在遥感影像上表现为在平缓的岩溶谷地或岩溶平原内出现麻点状的近圆形的凹坑；

(3)地下河出入口：具有河流主要特征的岩溶水地下通道为地下河，其出入地下的位置为地下河出入口，遥感影像上为弯曲水系突然出现或消失。

3.5.5 土地利用解译标志

土地利用分布及程度反映出人类活动的强度，对地质灾害发生有一定的影响^[29]。在光学影像上较易识别土地利用类型，其中：林地多沿山体分布，深绿色色调，斑点状纹理；耕地则多分布于洼地、阶地、坝子及斜坡处，呈绿色、土黄色色调，斑块状纹理；居民点和工矿用地反射率高，色调亮，居民点块状零散分布，多与耕地相伴出现，工矿用地形状多规则，位于采场、城镇等附近；水域在遥感影像上多呈深绿色，不规则曲面，纹理平滑细腻，边界清晰(图5)。

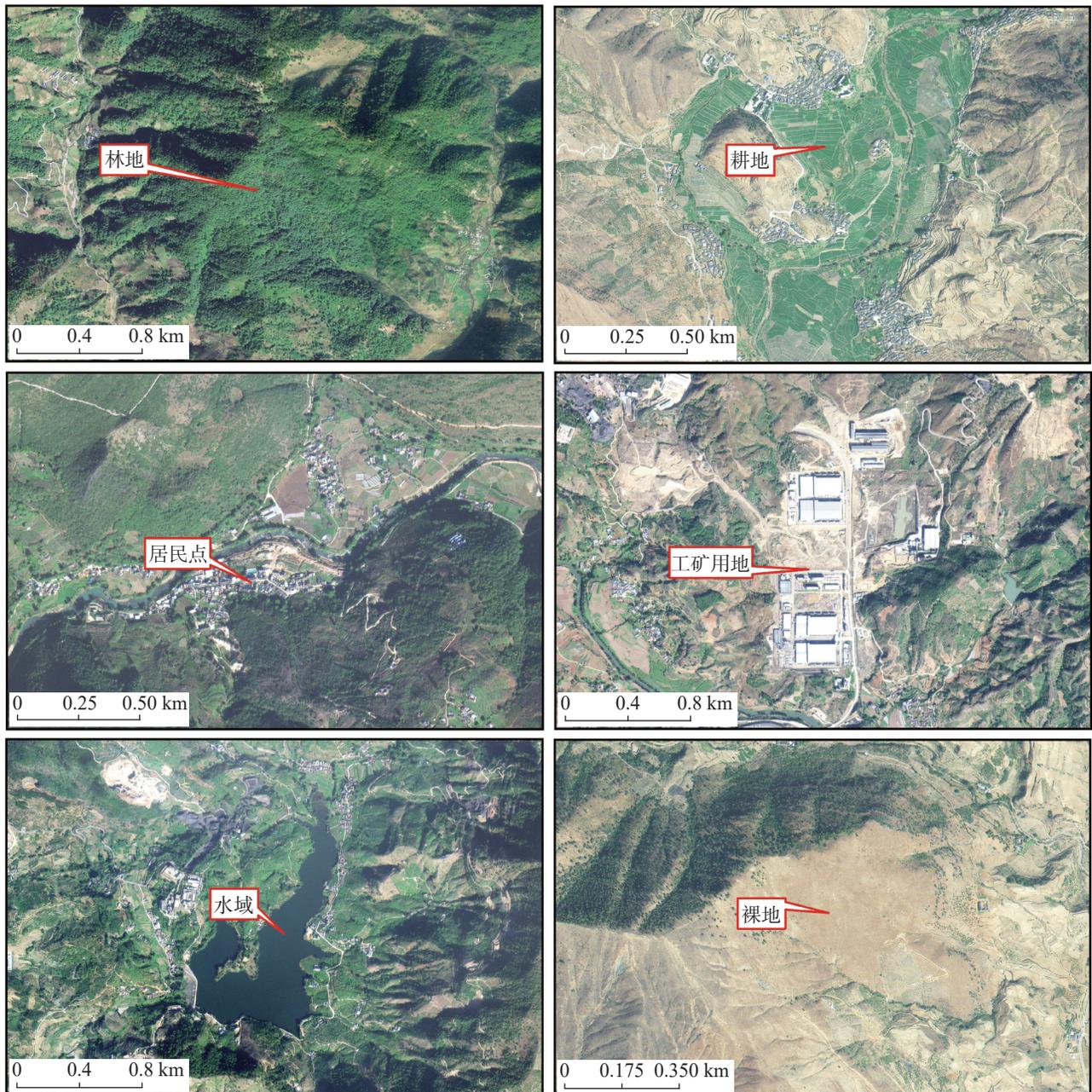


图5 华坪县典型土地利用遥感影像图

Fig. 5 Remote sensing images of typical land use in Huaping county

3.5.6 人类活动解译标志

华坪县主要的人类工程活动为矿业开采、农耕垦殖和工程建设(图6),其中:

(1) 矿山开采: 光学影像特征一般较为明显, 亮白色色调, 影纹粗糙, 植被覆盖低, 通常位于道路两侧或有单独道路相连, 可见新鲜开采岩面;

(2) 农耕垦殖: 特点是广泛而分散、规模小而频繁、影响深度浅而强烈, 影像特征为沿斜坡分布, 因耕作呈绿色、褐色调;

(3) 工程建设: 电力建设主要为太阳能发电, 多沿山脊或斜坡分布, 呈不规则面状, 灰黑色色调, 条带状纹理; 大型水电站横跨河谷, 色调发白, 附近可见多处工矿用地; 城镇建设具有一般城市典型的遥感特征, 即居民地、建设用地和交通干线等, 在遥感图像上较易解译, 因扩建常在周围形成亮白色调区; 正在修建的道路为线状或带状, 颜色呈白色、灰色, 反射率强, 两侧常有不稳定斜坡发育。

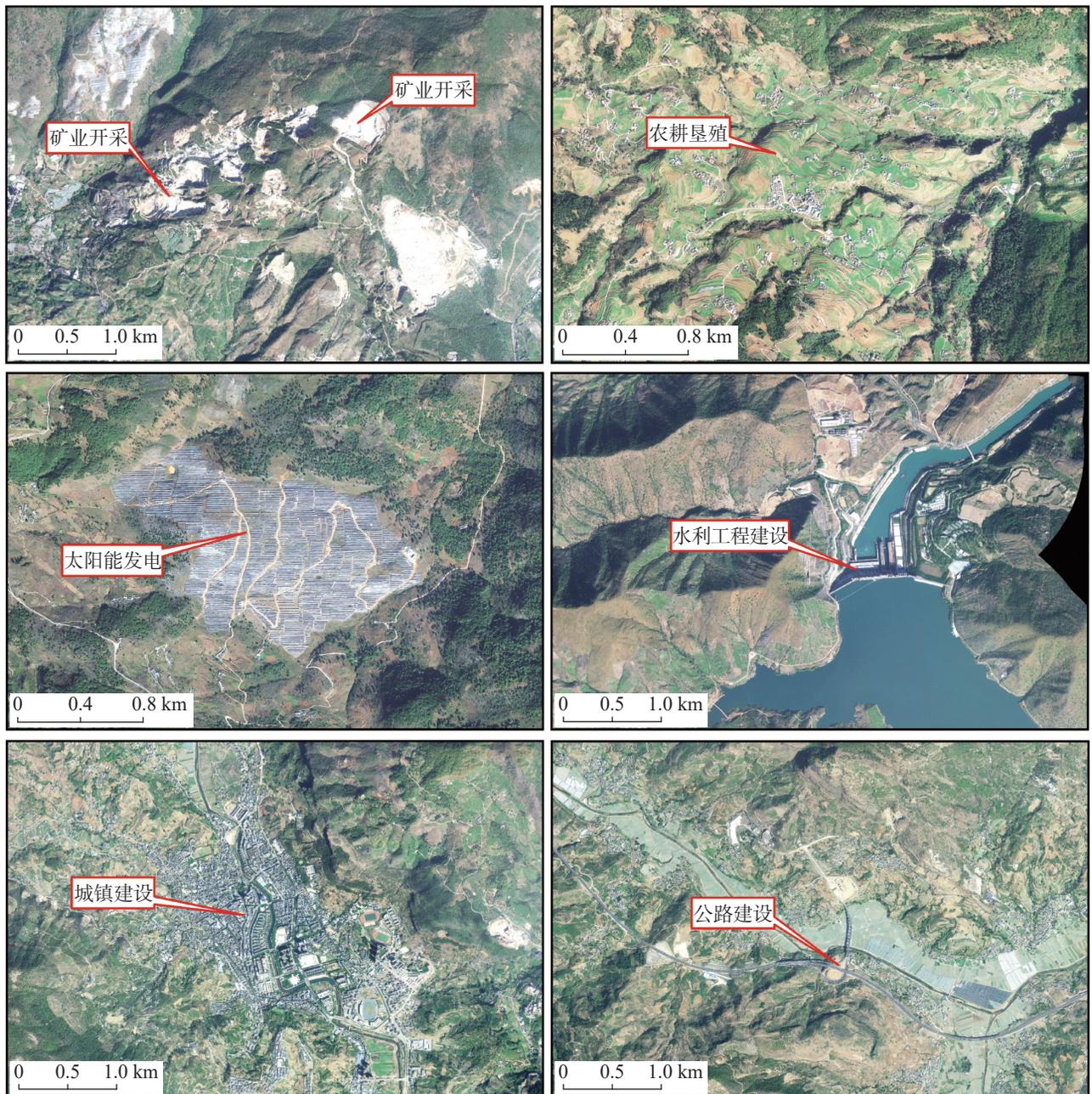


图6 华坪县典型人类活动遥感影像图

Fig. 6 Remote sensing images of typical human activities in Huaping county

3.5.7 不良地质现象解译标志

坡面侵蚀、活动冲沟等不良地质现象常造成水土流失,影响斜坡稳定性。坡面侵蚀包括在坡面发生的一切侵蚀现象;还在继续发展的冲沟即为活动冲沟,其在遥感影像上沿坡面分布,沟体仍在下切,沟头未到山脊(图 7)。

3.6 遥感解译成果

华坪县全要素地质环境遥感解译成果包含了 22 种点、线、面文件,本文以地质构造为例展示地质环境遥感解译成果(图 8)。

4 示范案例

以华坪县八德村滑坡隐患为示范案例,展示县域地质环境遥感解译成果如何在单体地质灾害隐患早期识别工作中发挥作用,以期快速、全面获取单体地质灾害隐患的孕灾背景,完成隐患早期识别及风险评价。

4.1 单体隐患地质环境信息获取

八德村滑坡隐患位于华坪县新庄傈僳族傣族乡西南侧,其在光学遥感影像上,呈典型的“圈椅状”形态,周界清晰、形态特征明显,长约 1000 m,最大宽约 500 m,主滑方向 20°(图 9)。在前期完成的县域地质环境遥感解译成果中,截取八德村滑坡隐患区域的地质环境情况(图 10),结合光学遥感影像特征,快速掌握该滑坡隐患的 7 类地质环境指标特征(表 4)。

4.2 隐患室内识别与评价

文章采用表 4 中 7 类地质环境指标研判单体隐患的具体步骤和内容可归纳为:(1)根据地表形变特征和地形地貌指标,确定隐患活动性和发生的地形条件;(2)根据地质构造、地层岩性、水文地质条件和不良地质现象 4 类指标,判断隐患的孕灾环境背景;(3)根据人类活动和土地利用 2 类指标,判断隐患承灾体类型、危害性;(4)根据活动性和危害性进行隐患风险程度评价。

首先,根据遥感影像及地形地貌指标可知,隐患所处斜坡为凹坡,坡度集中于 10°~20°,后缘陡峭,局部坡度超过 30°,前缘被在建高速和河谷切割,临空条件良好,地貌类型为高中山谷地地貌,具备灾害发生的地形条件。前期工作已获取了隐患所在斜坡的地表形变特征(图 11),结果显示隐患区域中部形变明显,最大形变速率 51.90 mm·a⁻¹,平均形变速率 11.95 mm·a⁻¹,整体形变明显,活动性高。

其次,根据地质构造、地层岩性、水文地质条件和不良地质现象 4 类指标可知,隐患区域地质构造不发育,地层岩性为震旦系上统观音崖组(Zbg),产状为 60°∠20°,上、中部为紫红色、灰白色页岩与灰岩、白云岩互层,下部为灰白色石英砂岩、长石石英砂岩、底部具有砾岩,含岩溶裂隙水,节理裂隙发育,表层风化作用强,具有软硬相间的岩土性质,且近顺层坡,具备滑坡发生的环境背景条件。

再者,根据人类活动和土地利用 2 类指标可知,隐患坡面多开垦为耕地,前缘为在建的高速公路,中下部右侧为居民点,后部左侧为工矿用地,后缘分布少量林地、可见一处采场,乡村道路贯穿斜坡,整体

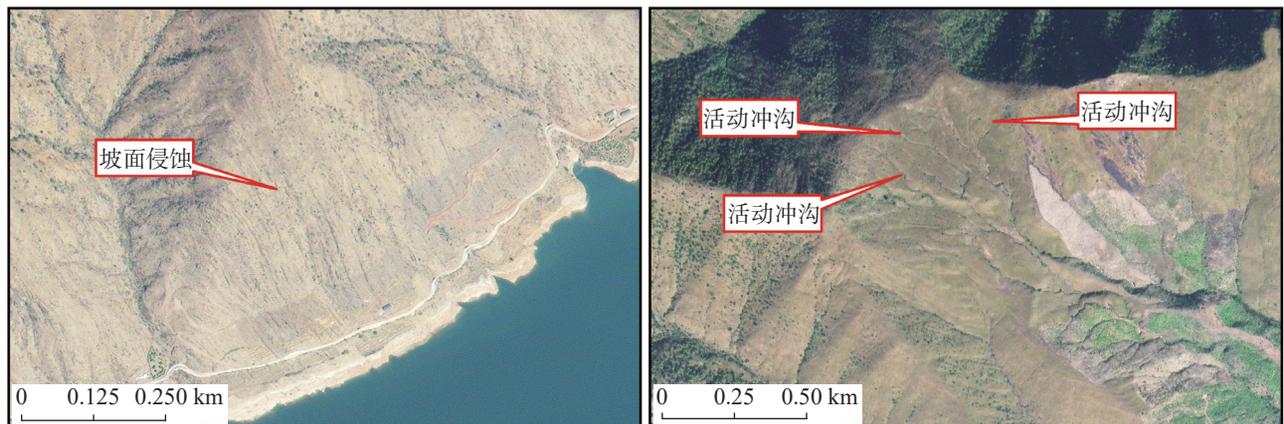


图 7 华坪县典型不良地质现象遥感影像图

Fig. 7 Remote sensing images of typical adverse geological phenomena in Huaping county

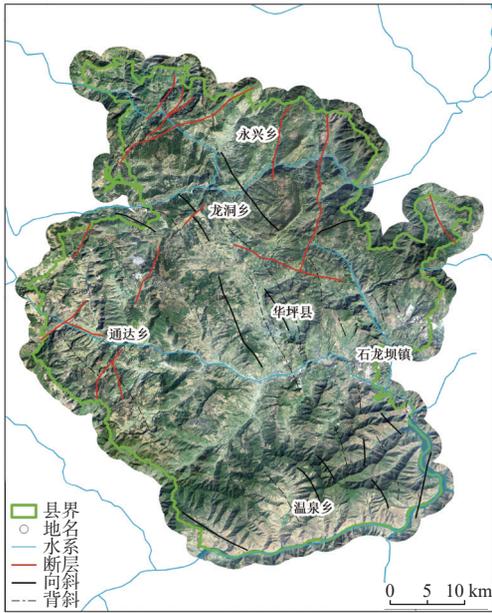


图 8 华坪县地质环境解译遥感解译成果(地质构造)
 Fig. 8 Remote sensing results of geological environment interpretation of geological structures in Huaping county

植被覆盖一般、人类活动强烈。威胁对象为 100 户居民、在建高速、后缘工厂和矿山,危害性高。

最后,按照《地质灾害风险调查评价技术要求(1:50 000)(试行)》的风险评价标准^[32],室内解译其为高风险滑坡隐患。

4.3 实地核查验证

实地调查(图 9,图 12)表明,隐患所在斜坡处于

高中山谷地地貌,基岩具有软硬相间的岩土性质,近顺层坡,加之前缘被在建高速和河谷切割,临空条件良好,后缘采场损耗坡体完整性,整体具备灾害发生的背景条件,与室内解译一致;现场调查发现隐患区域房屋、地面开裂、沉陷、鼓包严重,变形明显,严重威胁前缘居民点、华丽高速以及后部的搅拌厂,整体活动性高、危害性高,野外核定为高风险滑坡隐患,与室内隐患的风险等级一致。结果表明:基于地质环境遥感解译的隐患早期识别类型、风险程度均正确,有效提高了隐患识别的效率和正确性。

5 结论与建议

(1)基于地质灾害隐患的县域地质环境条件遥感解译体系梳理归纳为地形地貌、地质构造、地层岩性、水文地质、土地利用、人类活动及不良地质现象 7 类,在此基础上结合华坪县地质环境概况再细化为具体遥感解译要素。采用 7 类地质环境要素解译研判单体隐患:①根据地表形变特征和地形地貌指标,确定隐患活动性和发生的地形条件;②根据地质构造、地层岩性、水文地质条件和不良地质现象 4 类指标,判断隐患的孕灾环境背景;③根据人类活动和土地利用 2 类指标,判断隐患承灾体类型、危害性;④根据活动性和危害性进行隐患风险程度评价。最终的隐患风险程度需经过野外核校。

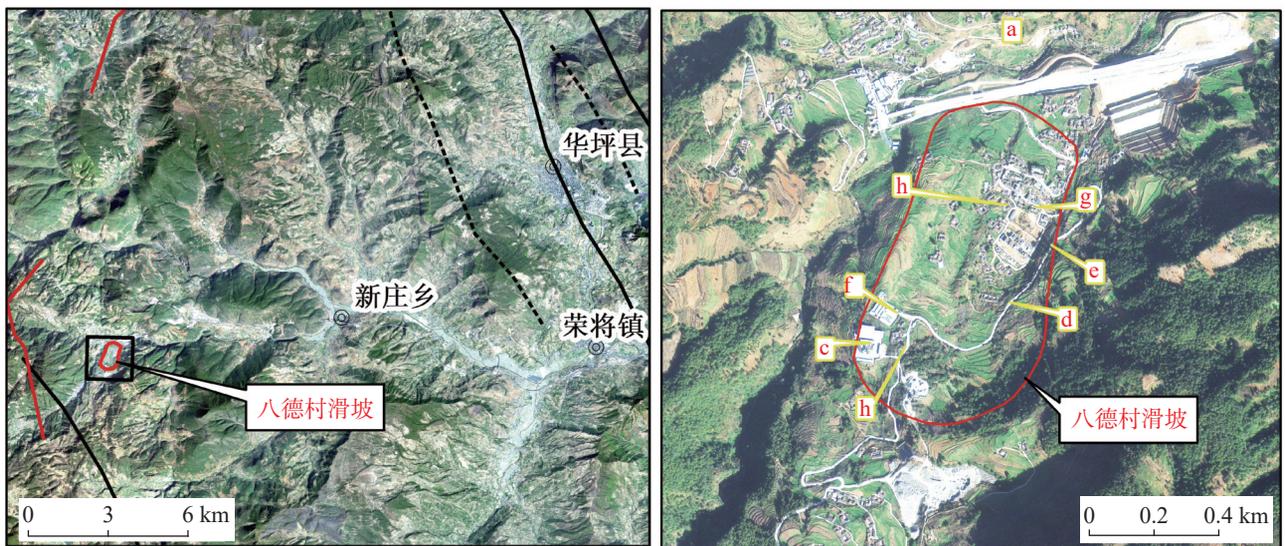


图 9 八德村滑坡隐患光学遥感影像

Fig. 9 Optical remote sensing images of potential landslides in BADE village

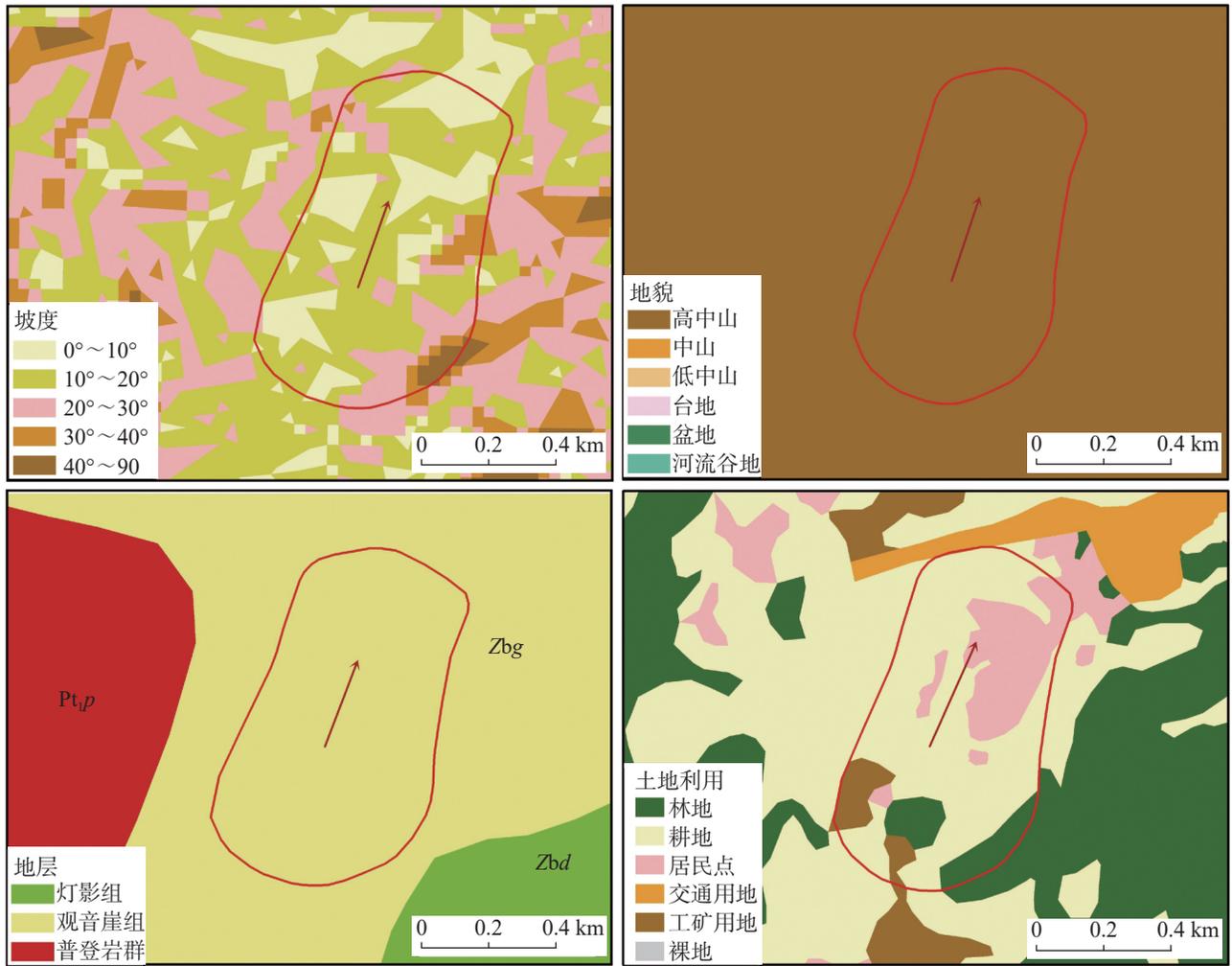


图 10 八德村滑坡隐患地质环境遥感解译

Fig. 10 Remote sensing interpretation of geological environment of potential landslides in Bade Village

表 4 八德村滑坡隐患地质环境特征

Table 4 Geological environment characteristics of potential landslides in Bade village

序号	地质环境大类	地质环境特征
1	地形地貌	高中山谷地地貌, 凹坡, 坡向20°, 坡度不均, 10°~30°
2	地质构造	未见
3	地层岩性	基岩地层为震旦系上统观音崖组(Zbg), 产状60°∠20°, 上、中部为紫红色、灰白色页岩与灰岩、白云岩互层, 下部为灰白色石英砂岩、长石石英砂岩, 底部具有砾岩, 软硬相间的岩土性质, 近顺层坡; 岩体节理裂隙发育, 表层风化作用强, 基岩破碎
4	水文地质	碎屑岩夹碳酸盐岩类含水岩组, 含岩溶裂隙水, 未见明显地下水迹象
5	土地利用	耕地、林地、居民点、工矿用地, 土地利用类型特征明显
6	人类活动	矿业开采、公路建设、农耕垦殖, 人类活动强烈
7	不良地质现象	未见

(2)开展地质环境全要素光学遥感解译工作,可迅速、准确地掌握单体地质灾害隐患(如华坪县八德村滑坡隐患)的孕灾背景条件,有效提高地质灾害隐患早期识别准确率,对西南山区地质灾害隐患识别工作具有指导意义。建议在地质灾害隐患早期识别

工作中全面开展区域地质环境全要素遥感解译。

致谢: 感谢中国自然航空物探遥感中心提供北京二号卫星数据, 同时感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

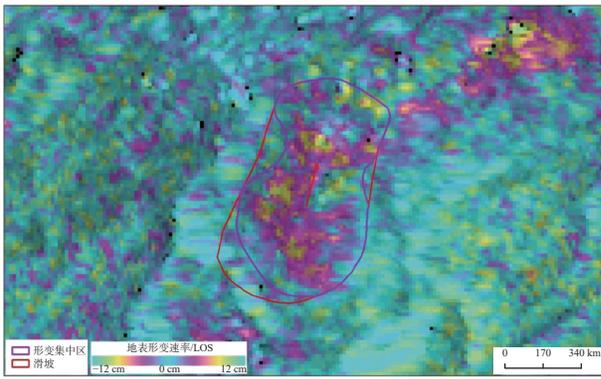


图 11 八德村滑坡隐患地表形变速率图

Fig. 11 Surface deformation rates of potential landslides in Bade village



图 12 八德村滑坡隐患实地调查情况

Fig. 12 Field investigation of potential landslides in Bade village

参考文献

[1] 范一大, 吴玮, 王薇, 刘明, 温奇. 中国灾害遥感研究进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1170-1184.
 FAN Yida, WU Wei, WANG Wei, LIU Ming, WEN Qi. Research progress of disaster remote sensing in China[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 1170-1184.

[2] 李树德. 中国滑坡、泥石流灾害的时空分布特点[J]. 水土保持研究, 1999, 6(4): 33-37.
 LI Shude. The temporal and spacial distribution of landslide and debris flow disasters in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1999, 6(4): 33-37.

[3] 铁永波, 葛华, 高延超, 白永健, 徐伟, 龚凌枫, 王家柱, 田凯, 熊小辉, 范文录, 张宪政. 二十世纪以来西南地区地质灾害研究历程与展望[J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(4): 653-665.
 TIE Yongbo, GE Hua, GAO Yanchao, BAI Yongjian, XU Wei, GONG Lingfeng, WANG Jiazhu, TIAN Kai, XIONG Xiaohui, FAN Wenlu, ZHANG Xianzheng. The research progress and prospect of geological hazards in Southwest China since the 20th century[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(4): 653-665.

[4] 葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 李振洪. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 949-956.
 GE Daqing, DAI Keren, GUO Zhaocheng, LI Zhenhong. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: Thoughts and recommendations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 949-956.

[5] Xie M W, Huang J X, Wang L W, Huang J H, Wang Z F. Early landslide detection based on D-InSAR technique at the Wudongde hydropower reservoir[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 1-13.

[6] Sun Q, Zhang L, Ding X, Hu J, Li Z W, Zhu J J. Slope deformation prior to Zhouqu, China landslide from InSAR time series analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 156: 45-57.

[7] 王绚, 范宣梅, 杨帆, 董秀军. 植被茂密山区地质灾害遥感解译方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1771-1781.
 WANG Xuan, FAN Xuanmei, YANG Fan, DONG Xiujun. Remote sensing interpretation method of geological hazards in lush mountainous area[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11): 1771-1781.

[8] 闫茂华, 魏云杰, 李亚民, 刘明学, 王文沛, 王俊豪, 曹峰. 云南德钦日因卡滑坡孕灾背景及形成机理[J]. 地质通报, 2020, 39(12): 1971-1980.
 YAN Maohua, WEI Yunjie, LI Yamin, LIU Mingxue, WANG Wenpei, WANG Junhao, CAO Feng. Development characteristics and formation mechanism of Deqin Riyinka landslide in Yunnan[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(12): 1971-1980.

[9] 李滨, 殷跃平, 高杨, 邢爱国, 黄波林, 贺凯, 赵超英, 万佳威. 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 5-13.
 LI Bin, YIN Yueping, GAO Yang, XING Aiguo, HUANG Bolin, HE Kai, ZHAO Chaoying, WAN Jiawei. Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of Southwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4):

- 5-13.
- [10] 许强. 构建新“三查”体系 创建地灾防治新机制[OL]. 北京: 中国矿业报, 2018(2018-3-12). <https://www.51ore.com/kyxw/17220.html>.
- [11] 许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1651-1659.
XU Qiang. Understanding and consideration of related issues in early identification of potential geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1651-1659.
- [12] 湖南省地质环境监测总站. 地质灾害遥感调查技术规定: DD2015-01[S]. 北京: 中国地质调查局, 2015.
- [13] 安徽省地质调查院. 区域地质调查中遥感技术规定(1: 50 000): DZ/T 0151-2015[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2015.
Geological Survey of Anhui Province. Specification of remote sensing technique in regional geological survey (1: 50,000): DZ/T 0151-2015[S]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2015.
- [14] 中国国土资源航空物探遥感中心. 区域环境地质勘查遥感技术规定(1: 50 000): DZ/T 0190-2015[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2015.
China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources. Specification of remote sensing technology for regional environment geological exploration (1: 50,000): DZ/T 0190-2015[S]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2015.
- [15] 中国地质环境监测院. 地质灾害危险性评估规范: GB/T 40112-2021[S]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2021.
China Institute of Geo-Environment Monitoring. Specifications for risk assessment of geological hazard: GB/T 40112-2021[S]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2021.
- [16] Rosi A, Tofani V, Tanteri L, Tacconi Stefanelli C, Agostini A, Catani F, Casagli N. The new landslide inventory of Tuscany (Italy) updated with PS-InSAR: Geomorphological features and landslide distribution[J]. *Landslides*, 2018, 15(1): 5-19.
- [17] Dong J, Liao M S, Xu Q, Zhang L, Tang M G, Gong J Y. Detection and displacement characterization of landslides using multi-temporal satellite SAR interferometry: A case study of Danba county in the Dadu river basin[J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 95-109.
- [18] 陈立权, 赵超英, 任超锋, 王佩杰, 陈雪蓉, 陈恒祎. 光学遥感用于贵州发耳镇尖山营滑坡监测研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 518-523.
CHEN Liquan, ZHAO Chaoying, REN Chaofeng, WANG Peijie, CHEN Xuerong, CHEN Hengyi. Monitoring the Jianshanying landslide in a karst mountainous area of Guizhou by optical remote sensing[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 518-523.
- [19] 付豪, 李为乐, 陆会燕, 许强, 董秀军, 郭晨, 谢毅, 王栋, 刘刚, 马志刚. 基于“三查”体系的丹巴县滑坡隐患早期识别与监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 734-746.
FU Hao, LI Weile, LU Huiyan, XU Qiang, DONG Xiujun, GUO Chen, XIE Yi, WANG Dong, LIU Gang, MA Zhigang. Early detection and monitoring of potential landslides in Danba county based on the space-air-ground investigation system[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 734-746.
- [20] 贺凯, 李滨, 赵超英, 高杨, 陈立权, 刘朋飞. 基于易滑地质结构与多源数据差异的岩溶山区大型崩塌灾害识别研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 467-477.
HE Kai, LI Bin, ZHAO Chaoying, GAO Yang, CHEN Liquan, LIU Pengfei. Identification of large-scale landslide hazards based on differences of geological structure prone to sliding and multiple-source data in karst mountainous areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 467-477.
- [21] 董佳慧, 牛瑞卿, 亓梦茹, 丁赞, 徐航, 何睿. InSAR技术和孕灾背景指标相结合的地灾隐患识别[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 187-196.
DONG Jiahui, NIU Ruiqin, QI Mengru, DING Zan, XU Hang, HE Rui. Identification of geological hazards based on the combination of InSAR technology and disaster background indicators[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(2): 187-196.
- [22] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天一空一地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966.
XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957-966.
- [23] 刘传正. 论地质灾害风险识别问题[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 1-7.
LIU Chuazheng. Research on the risk recognition of geological disasters[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(4): 1-7.
- [24] 刘传正, 张明霞, 刘艳辉. 区域地质环境可持续利用评价体系初步研究[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 242-245.
LIU Chuazheng, ZHANG Mingxia, LIU Yanhui. A system of geo-environment evaluation based on sustainable land-use[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(1): 242-245.
- [25] 孟晖, 张若琳, 石菊松, 李春燕. 地质环境安全评价[J]. 地球科学, 2021, 46(10): 3764-3776.
MENG Hui, ZHANG Ruolin, SHI Jusong, LI Chunyan. Geological environment safety evaluation[J]. *Earth Science*, 2021, 46(10): 3764-3776.
- [26] 云南华昆国电工程勘察有限公司. 云南省华坪县地质灾害详细调查报告[R]. 2014: 50-98.
- [27] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.
HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. *Chinese Journal of*

- Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 433-454.
- [28] 刘传正, 陈春利. 中国地质灾害成因分析[J]. 地质论评, 2020, 66(5): 1334-1348.
LIU Chuazheng, CHEN Chunli. Research on the origins of geological disasters in China[J]. *Geological Review*, 2020, 66(5): 1334-1348.
- [29] 张丽君. 从土地利用规划入手提高地质灾害的防治水平: 兼议地质灾害风险区划的急迫性与重要性[J]. 地质通报, 2009, 28(2-3): 343-347.
ZHANG Lijun. Prevention of geological hazard starting from land use planning[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(2-3): 343-347.
- [30] 刘传正. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型[J]. 地质论评, 2014, 60(4): 858-868.
LIU Chuazheng. Genetic types of landslide and debris flow disasters in China[J]. *Geological Review*, 2014, 60(4): 858-868.
- [31] 蒋小珍, 冯涛, 郑志文, 雷明堂, 张伟, 马骁, 伊小娟. 岩溶塌陷机理研究进展[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 517-527.
JIANG Xiaozhen, FENG Tao, ZHENG Zhiwen, LEI Mingtang, ZHANG Wei, MA Xiao, YI Xiaojuan. A review of karst collapse mechanisms[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(3): 517-527.
- [32] 中国地质环境监测院. 地质灾害风险调查评价技术要求(1:50000)(试行)[S]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2020.

Remote sensing interpretation and application of geological environment conditions in early identification of potential geo-hazards: A case study of Huaping county

YANG Yanfang^{1,2}, JU Hejian³, CHENG Yang^{1,2}, WANG Yong^{1,2}, YAN Shuhao⁴, WANG Shanshan⁴, LI Qin^{5,6,7}

(1. *Institute of Karst Geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/ International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China*; 2. *Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China*; 3. *Nanning College of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*; 4. *China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China*; 5. *Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming, Yunnan 650216, China*; 6. *Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650216, China*; 7. *Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China*)

Abstract Huaping county is located in the mountains bordering the Yunnan–Guizhou Plateau and the Qinghai–Xizang Plateau, where geo-hazards occur frequently. In order to understand the background of disaster generation and the laws of their occurrence, as well as to enhance the accuracy of early identification of potential geo-hazards and reduce the likelihood of disasters, this study has developed a county-level system for remote sensing interpretation of the geological environment. This system is designed for the early identification of potential geo-hazards, based on practical work and existing norms and standards. Additionally, this study has established a set of full-element interpretation signs for geological environment conditions in Huaping county by utilizing Beijing-2 High-Resolution Optical Remote Sensing Images, thereby completing the remote sensing interpretation of the geological environment in Huaping county. Based on the interpretation results of the geological environment in this county, this study examines the potential landslide hazards in Bade village, Huaping county, as a case study. It demonstrates how remote sensing interpretation of the geological environment facilitates the early identification and risk assessment of potential geo-hazards occurring in a single geographic unit. The overall findings of this study are as follows:

(1) The remote sensing interpretation system of county-level geological conditions, based on potential geo-hazards, can be summarized and classified into seven categories: topography and geomorphology, geological structure, stratum lithology, hydrogeology, land use, human activities, and adverse geological phenomena.

(2) With the use of seven categories of geological environment elements, the process of interpreting and assessing potential disasters in a single geographic unit can be summarized as the following steps. First, the characteristics of surface deformation, and indicators of topography and geomorphology were analyzed to determine the activity and the topographic associated with the occurrence of potential geo-hazards. Second, based on the four kinds of indicators of geological structure, stratum lithology, hydrogeological conditions, and adverse geological phenomena, hidden dangers

in the disaster environment were assessed. Third, with the use of two indicators of human activities and land use, the type of the hidden bearing body and the associated hazards were evaluated. Finally, the risk level of the hidden danger was evaluated based on the activity and the potential harm involved. It is important to note that this assessment was conducted indoors, and the final risk level must be verified in the field.

(3) Conducting a full-element optical remote sensing interpretation of geological environment can rapidly and accurately assess the disaster-bearing conditions of specific geo-hazards in a single geographical unit such as the potential landslides in Badu village, Huaping county. This approach can significantly enhance the accuracy of early identification of potential geo-hazards and holds significant importance for identifying such geo-hazards in the mountainous areas of Southwest China. It is recommended to implement a thorough remote sensing interpretation.

Key words geological environment, remote sensing, interpretation signs, potential landslides of Bade village, early identification

(编辑 黄晨晖)

第 26 届全国洞穴学术会议在重庆顺利召开

第 26 届全国洞穴学术会议暨全联旅游业商会旅游洞穴分会第二届第三次理事大会于 2024 年 11 月 16 日在重庆西南大学地理科学学院顺利召开。

本次会议汇聚了来自全国各地高校、科研机构、地质公园管理部门及企业的 127 名代表,共同探讨了洞穴科学与喀斯特研究的最新进展。34 名专家代表围绕“喀斯特与洞穴环境人地关系新思考”“国内外洞穴旅游研究热点与发展趋势”等主题,展开了深入交流。研讨内容涉及国际地科联世界地质遗产地“桂林喀斯特”的地学内涵、溶洞时序不确定性的概念及其地质意义、贵州双河洞大熊猫化石研究进展、

喀斯特溶洞的全感官沉浸式体验设计与探索、中国洞穴鱼类及维管植物多样性研究新进展、洞穴研学课程、新一代无纸化洞穴测量技术、洞穴保护立法等前沿话题。

此外,会议还举办了洞穴探测图和科普书籍展览,旨在提升公众对洞穴保护与研究的认知,促进科学传播与公众教育。此次大会成功搭建了一个跨学科、跨领域的学术交流平台,推动了中国洞穴研究的深入发展,并为洞穴资源的可持续利用与保护提供了创新思路。

(供稿:张远海)