

doi: 10.6046/zrzyg.2021313

引用格式: 辛荣芳,李宗仁,张焜,等. 青海省湟水流域地质灾害动态变化遥感监测[J]. 自然资源遥感,2022,34(4):254-261.
(Xin R F, Li Z R, Zhang K, et al. Remote sensing monitoring of the dynamic changes in geologic hazards in the Huangshui River basin of Qinghai Province[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 254-261.)

青海省湟水流域地质灾害动态变化遥感监测

辛荣芳^{1,2,3,4}, 李宗仁^{1,2,3,4}, 张焜^{1,2,3,4}, 张兴^{1,2,3,4}, 黄丽^{1,2,3,4}, 刘宝山^{1,2,3,4}

(1. 青海省地质调查院, 西宁 810012; 2. 青海省遥感大数据工程技术研究中心, 西宁 810012; 3. 自然资源青海卫星应用技术中心, 西宁 810012; 4. 青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 西宁 810012)

摘要: 为了解近年来青海省湟水流域地质灾害频发原因,以 GF-1 和 GF-2 卫星遥感数据为主要信息源,在多源、多时相、多期次的遥感影像对比监测的基础上,基于地学知识的支撑,通过研究区已有地质灾害研究资料整理分析甄别、室内遥感影像解译和野外实地调查验证等方法建立了详细、可靠的地质灾害空间分布数据库,通过地理信息系统(geographic information system, GIS)空间分析模型,结合地质灾害参数指标进行统计分析,探讨了地质灾害发生、发展与地质环境、自然因素和人类活动的关系。结果表明:2017 年区内共发现崩塌和滑坡等地质灾害点 3 188 处,2009 年以来发生变化的地质灾害点 233 处。在地质灾害诸多形成条件中,地质环境条件变化缓慢、人类工程活动和降雨则是最活跃的因素,可见在二者的双重作用下诱发了地质灾害。

关键词: 地质灾害; 湟水流域; 动态变化; 遥感监测; 变化分析

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)04-0254-08

0 引言

湟水流域作为青海省经济文化最发达地区,集中了青海省近 60% 的人口、52% 的耕地和 70% 以上的工矿企业,特定的地貌、气候和地质环境以及经济与社会的持续快速发展使得地质灾害发生数量明显增加^[1]。因而研究该区域地质灾害成因、动态变化特征具有巨大的现实意义,可为青海省地质灾害防治工作提供基础数据和建议。

以往我国开展的地质灾害遥感调查以国外卫星为主^[2-4],随着高分辨率对地观测系统重大专项、国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025 年)的实施,ZY-3,ZY1-02C,GF-1 和 GF-2 等遥感数据提高了我国高空间分辨率卫星数据自给率,已逐步取代同等分辨率的国外卫星遥感数据,且近几年来在地质灾害遥感调查中得到了广泛应用^[5-6];但研究区内的地质灾害调查工作停留在以县、市为单位的实地调查,在宏观观测与动态调查研究方面有所欠缺。本次研究从宏观的角度去了解研究地质灾害的分布情况及诱发原因,利用国产卫星

遥感数据分辨率高的特点,提取广域范围内的灾害信息,对研究区内的地质灾害研究提供了极大的便利^[7-9],亦推动了国产高分遥感数据在重大自然灾害和突发事件应急监测与评估应用中的跨越式发展。

1 研究区概况

青海省湟水流域位于青藏高原东北部,青海省东部地区,地理坐标范围为 E100°40' ~ 103°03', N36°02' ~ 37°25',总面积约 1.6 万 km²。行政区划范围包括西宁市辖区、湟中县、湟源县、大通回族土族自治县、海东市平安区、乐都区、民和回族土族自治县和海北藏族自治州海晏县等 12 个县(区),其中湟中县于 2019 年撤县改区,研究阶段在此之前,因此本文中还是称为湟中县。研究区整体形态呈长条状,西宽东窄,地势西高东低(图 1),属高原干旱、半干旱大陆性气候,多风、少雨、日温差大、降雨量小但相对集中、蒸发量大、垂直气候分带明显。流域内年平均气温为 5.1 °C,最高气温为 34.7 °C,最低气温为 -32.6 °C,愈向上游气温愈低,海拔每升高 100 m,气温下降约 0.6 °C,其下游民和回族土族自治县多年均气

收稿日期: 2021-09-27; 修订日期: 2022-09-07

基金项目: 青海省科技成果转化专项项目“青海典型区地质灾害一体化监测关键技术研究及示范应用”(编号: 2019-SF-130)资助。

第一作者: 辛荣芳(1989-),女,学士,工程师,主要从事地质矿产遥感技术应用研究。Email: qhxf@163.com。

通信作者: 李宗仁(1987-),男,硕士,高级工程师,主要从事资源与环境遥感应用研究。Email: 303523234@qq.com。

温为 9.07 ℃,上游海晏县多年平均气温为 -0.3 ℃。

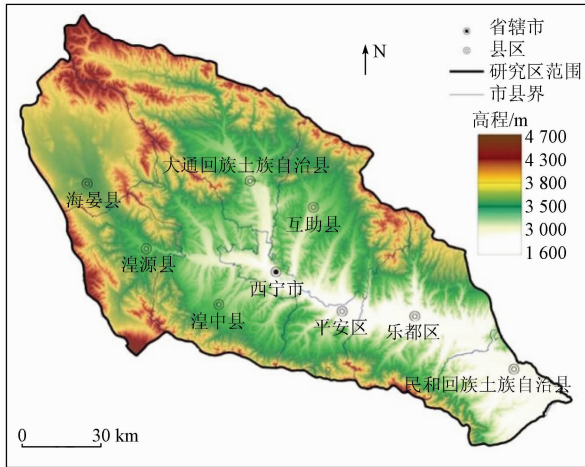


图 1 研究区地貌特征

Fig.1 Geomorphic feature of the study area

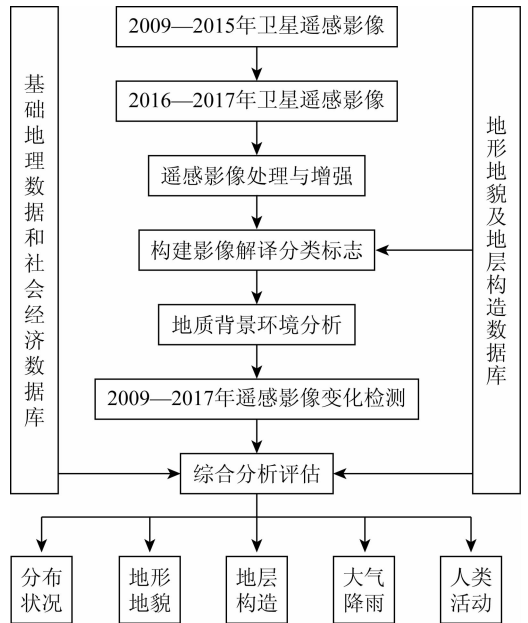
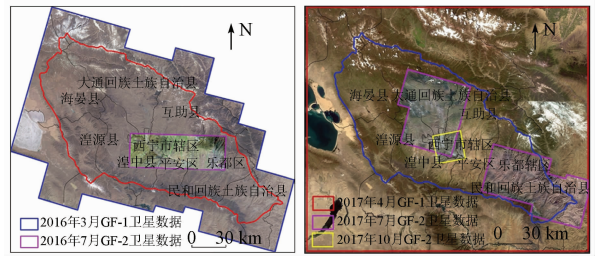


图 2 技术流程图

Fig.2 Technical flow chart

2 数据与方法

本文在前人研究成果的基础上,基于高分辨率多光谱遥感影像进行专题信息提取和变化监测分析,并利用地理信息系统(geographic information system, GIS)空间分析功能开展评估。具体技术流程如图 2 所示,主要包括以下 4 个部分: 1) 数据选取。本次研究选取了 2016 年 3 月、2017 年 4 月获取的 GF-1 数据和 2016 年 7 月、2017 年 7 月、2017 年 10 月获取的 GF-2 数据作为主要数据源进行地质灾害信息提取(图 3),同时还收集了研究区 2009—2015 年相关遥感影像作为监测对比数据(表 1)。



(a) 2016 年

(b) 2017 年

图 3 本研究所用国产高分遥感数据分布

Fig.3 Domestic high-resolution remote sensing data distribution for this study

表 1 监测对比数据收集情况一览表

Tab.1 List of monitoring and comparison data collection

序号	数据类型	覆盖地区	年份	分辨率/m
1	IKONOS	西宁市辖区	2014 年	1
2	TH-1	大通回族土族自治县、湟中县、湟源县、平安区、互助县	2014 年	5
3	ZY-3	乐都区、民和回族土族自治县、海晏县	2014 年	2.1
4	Resurs-P1	西宁市辖区	2013 年	5
5	ZY-3	大通回族土族自治县、湟中县、湟源县、乐都区、平安区、民和县、互助县、海晏县	2013 年	2.1
6	GeoEye	西宁市辖区	2012 年	0.41
7	TH-1	大通回族土族自治县、湟中县、湟源县、乐都区、平安区、互助县、海晏县	2012 年	5
8	ZY-3	民和回族土族自治县	2012 年	2.1
9	GeoEye	西宁市辖区	2011 年	0.41
10	ZY-3	大通回族土族自治县、湟中县、湟源县、乐都区、平安区、民和回族土族自治县、互助县、海晏县	2011 年	2.1
11	WorldView-2	西宁市辖区	2010 年	0.46
12	Cartosat-1	大通回族土族自治县、湟中县、湟源县、乐都区、平安区、民和回族土族自治县、互助县、海晏县	2010 年	5
13	WorldView-2	西宁市辖区	2009 年	0.46
14	RAPIDEYE	大通回族土族自治县、湟中县、湟源县、乐都区、平安区、民和回族土族自治县、互助县、海晏县	2009 年	5

2) 图像处理。主要包括正射校正、地理配准、影像融合等。首先利用数字高程模型(digital elevation model, DEM)和影像 PRC 参数对 GF-1 和 GF-2 影像进行几何纠正和正射处理;其次利用自主研发的卫星影像自动化处理系统构建的青海省卫星影像基准网将不同时相、不同传感器的多源异构影像数据进行地理配准再采用全像素融合(Pansharpen)方法对 GF-1 和 GF-2 数据的多光谱与其全色波段进行融合,该方法在增强高分辨率空间纹理细节的同时,光谱信息失真度最小,更适合于国产高分影像的融合。

3) 地质灾害信息提取。首先,结合典型地质灾害的遥感样本库和高分遥感影像的数据特点,建立研究区地质灾害的高分辨率多光谱遥感信息分类提取标志,并基于 DEM 提取地质灾害发生前后的相关信息^[10-11];其次,进行地质灾害发生前后的影像变

化检测,通过人机交互解译形成地质灾害遥感监测成果。地质灾害在高分辨率多光谱影像上都具有明显的形态、结构和纹理特征。例如,滑坡(图4(a)):后壁一般较陡峭并呈围椅状,滑坡体与周围地质体在形态、色调、纹理、植被发育及生长状况上有明显的差异^[12-15];崩塌(图4(b)):堆积体地貌特征明显,多发育在沟谷或河流两侧的陡崖、陡坎或岩体破碎地带,崩塌后壁陡峭而粗糙,其颜色与岩性有关,多呈浅色调或接近灰白,植被稀疏,崩塌体在坡脚形成锥状的堆积体;泥石流(图4(c)):多呈浅色树枝状影像特征,泥石流沟口一般有扇状堆积物,其上流水线紊乱而明显;不稳定斜坡(图4(d)):发育于较陡山坡上,影像上表面粗糙,由于植被不发育,色调较浅,多呈灰白色、白色,局部失稳形成滑塌现象。

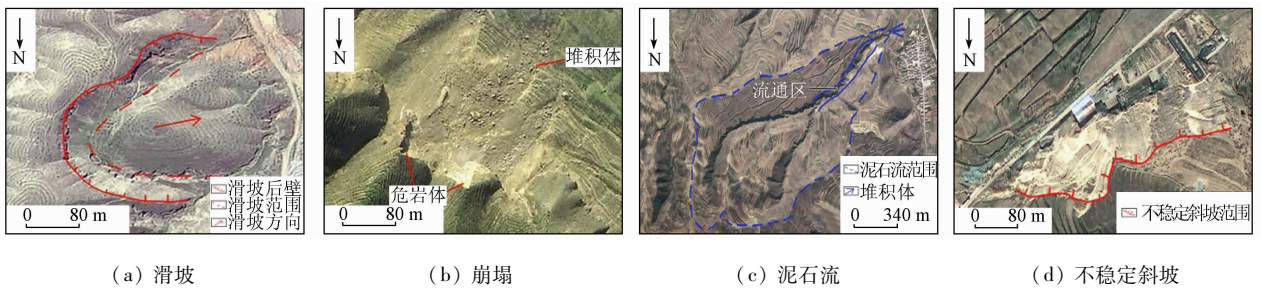


图4 典型地质灾害遥感解译标志

Fig. 4 Remote sensing interpretation indicators of typical geological disasters

4) 分析评估。综合利用地形分析、缓冲分析、叠加分析和统计分析等方法对地质灾害空间分布及变化同地质构造、地层岩性、地形地貌、大气降雨、人类工程活动等之间的关系进行分析评估。以栅格DEM数据为基础,利用ArcGIS软件中3D Analyst工具提取研究区坡度、坡向和坡型(曲率)等反映地形的各个因子;利用Spatial Analyst工具对地质构造、人类工程活动等数据进行缓冲分析,并与地质灾害数据叠加后统计得出地质灾害空间分布与地质构造、地层岩性、地形地貌、人类工程活动等孕灾背景数据的相关性;利用克里金插值法统计分析得出地质灾害在不同大气降雨区间的分布特征。通过上述分析结果剖析地质灾害的主要诱发因素及其变化特征,为地质灾害防治提供地质依据。

3 地质灾害分布特征

经2017年遥感调查,研究区共计有崩塌和滑坡等地质灾害点3188处(表2)。区内地质灾害在空

表2 研究区地质灾害遥感解译统计

Tab. 2 Statistic of remote sensing interpretation of geological disasters in the study area

灾害发育地质单元	崩塌/处	滑坡/处	不稳定斜坡/处	合计/处	所占比例/%
松散堆积物(Q ₂)	9	10	87	106	3.32
黄土(Q ₁)	105	1 172	1 152	2 429	76.20
碎屑岩(N)	46	119	45	210	6.60
碎屑岩(E)	13	125	42	180	5.64
碎屑岩(Mz)	5	35	39	79	2.48
碎屑岩(Pz)	2	1	21	24	0.75
变质岩(Pt)	20	9	87	116	3.63
花岗岩	6	2	36	44	1.38
合计	206	1 473	1 509	3 188	100

间分布上具有明显的差异性。从数量上看,地质灾害在空间分布上明显受控于地质背景条件,主要分布于第四纪黄土区,占区内地质灾害总数的76.20%。崩塌、滑坡及不稳定斜坡多具有群发性、多期次性特点;小型滑坡之间、小型滑坡与大型滑坡之间则存在明显的“亲和”性^[16],小型滑坡一般会成群出现,或者集中分布在大型滑坡之上及其周边。湟水谷地及其一级支沟中下游两侧是地质灾害的集

中发育区^[17],地质灾害沿湟水河及其一、二级支流中下游呈带状集中分布,其分布密度与河流及沟谷的侵蚀切割作用关系密切,河谷凹岸一般为崩塌集中发育区。泥石流沟主要分布于山前地带,少量分布于山区与丘陵区过渡带。不稳定斜坡多由人类工程活动引起,主要是由于人们削坡建房、修路开挖坡脚和矿业活动等破坏原有坡体而形成。

1)不同地貌分布特征。区内可分为侵蚀构造中高山、侵蚀构造中低山、侵蚀构造低山、剥蚀堆积黄土丘陵和河谷冲洪积平原 5 个地貌类型。绝大多数地质灾害位于剥蚀堆积黄土丘陵区,约占比例为 81.49%,特别在剥蚀堆积黄土丘陵区向河谷冲洪积平原区过度地带,是地质灾害的集中分布区。

2)不同地形分布特征。研究区大部分地区为高陡的斜坡地形,利用 DEM 数据将全区坡型划分为 4 个基本类型,即凸型、直线型、阶梯型和凹型,统计结果表明,区内地质灾害多位于凸型坡与直线型坡,共计 2 157 处。对全区滑坡、崩塌和不稳定斜坡所处斜坡坡向进行统计。结果表明,区内地质灾害坡向在 90°~135°,136°~180°和 270°~315°等 3 个区间的数量最多,共计 1 829 处,占总灾害数量的 57.38% (图 5)。因与区内河流发育走向有关,湟水河各主要支流总体走向呈 SW—NE 向,这就决定了河流两侧斜坡的坡向正好分布在以上 3 个区间之内,与灾害分布状况的统计结果相一致。

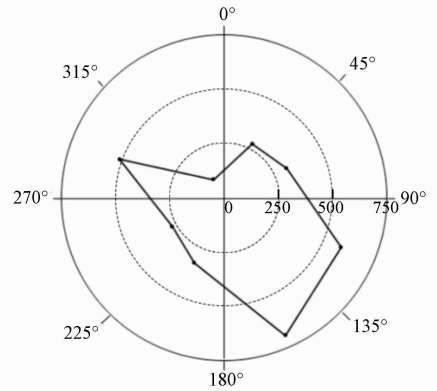


图 5 地质灾害坡向玫瑰花图

Fig. 5 Geological disasters slope rose diagram

3)不同岩性分布特征。区内地质灾害主要分布于黄土区与新近纪—古近纪碎屑岩区,其成因模式应有其特定的内在条件。研究区是由西南部的日月山断裂、拉脊山断裂和北部的达坂山南缘断裂围限的新生代盆地。古近纪的喜马拉雅运动使该地区弱隆起,中新世以后构造活动强烈,陆内汇聚作用加剧,形成了断裂控制下的断陷盆地,堆积了红色厚层的新生代河湖相沉积物^[18],为后期地质灾害的形成储备了丰富的物质条件。

4 地质灾害变化特征及成因分析

表 3 为研究区地质灾害变化分类统计。

表 3 研究区地质灾害变化分类统计

Tab. 3 Classified statistic of geological disasters changes in the study area

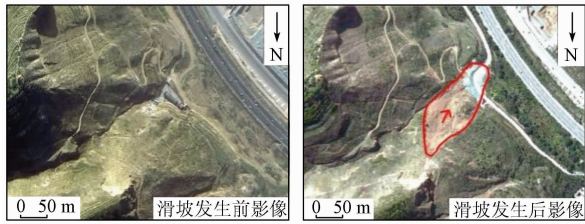
划分依据	名称	基本指标	数量	所占比例/%
灾害类型	崩塌	—	7	3.00
	滑坡	—	66	28.33
	泥石流	—	111	47.64
	不稳定斜坡	—	49	21.03
变化原因	自然因素	降雨等自然因素引起灾害发生变化	19	8.15
	交通建设	铁路、公路建设工程中对灾害形成影响	21	9.01
	矿业活动	矿山开采中对灾害形成影响	32	13.73
	房屋建设	城市或乡村发展中,向周边扩展,开挖坡脚或在泥石流沟建设工厂、房屋等	49	21.03
	农业活动	开荒建田过程中对灾害形成影响	6	2.58
	工程治理	对灾害进行工程治理	29	12.45
	搬迁治理	受威胁居民进行搬迁	77	33.05
	变化结果	新发生	新发生的滑坡、崩塌等灾害点	19
微变形		滑坡、崩塌、斜坡发生微小滑动或出现裂隙,泥石流沟内松散堆积物发生变化	51	21.89
威胁增加		灾害威胁区域内新建工厂、房屋和道路等,使其变为隐患点	55	23.61
实施治理		已实施工程治理或搬迁治理	108	46.35

以 2009—2010 年遥感影像为基准,通过与 2016 年、2017 年度遥感调查对比分析,区内共发现变化地质灾害点 233 处,约占区内地质灾害总数的 7.31%。其中,主要由降雨等自然因素引起地质灾害变化 19 处,因人类工程活动所导致的地质灾害变化达 214 处。

4.1 大气降雨与地质灾害变化

研究区 2009—2017 年间主要由降雨等自然因素引发的地质灾害变化 19 处,灾害类型以滑坡为主,所占地质灾害变化总量的 8.15%。大气降雨对地质灾害的诱发作用主要表现为改变地形地貌、土体结构及稳定性、土体的力学强度等^[19]。以西宁市

城东区王家庄滑坡为例,2017年8月5—8日市区持续强降雨,北山绿化区于8月8日发生山体滑坡。遥感影像显示(图6),滑坡体周界清晰,与周围色调差异明显,后壁呈弧形。滑坡体长约160 m,宽约80 m,



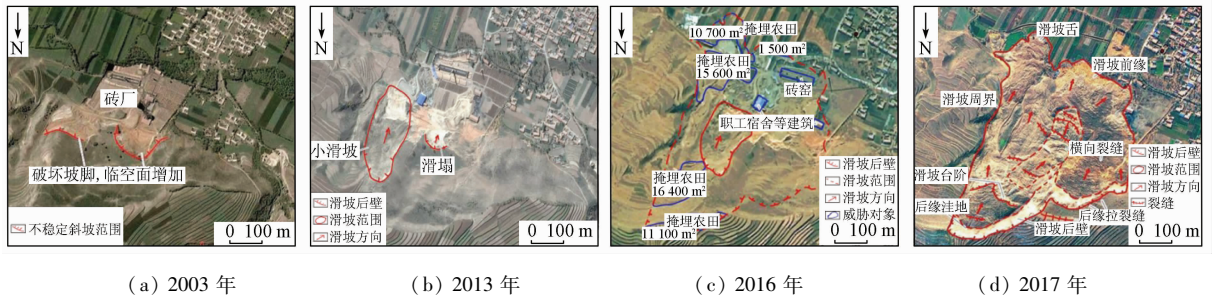
(a) 2016年 (b) 2017年

图6 西宁市城东区王家庄滑坡发生前后影像对比
Fig. 6 Image comparison of Wangjiashuang landslide before and after occurrence in Chengdong, Xining

平面面积约8 000 m²。滑坡造成4人死亡,绿化区看护房被掩埋。该处原为一崩塌隐患点,受西宁北山绿化长期灌溉和持续降雨的影响,泥岩中膏盐溶蚀后,形成大量空洞,并导致上覆黄土的吸力下降,强度显著降低,斜坡地带水力梯度增大,提高了水流的渗透力^[20]。重力荷载作用下岩土体发生蠕变剪切破坏,致使斜坡稳定性下降^[21-22],最终导致了滑坡的失稳滑动。

4.2 人类工程活动与地质灾害变化

研究区2009—2017年间因人类工程活动所导致的地质灾害变化有214处,所占地质灾害变化总量的91.85%。以大通回族土族自治县城关镇大庄滑坡为例(图7),2016年9月25日该处发生滑坡,



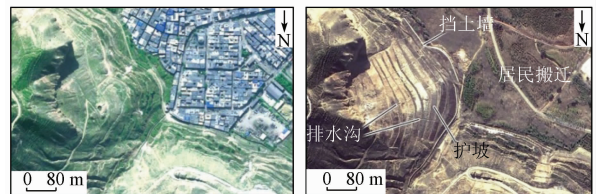
(a) 2003年 (b) 2013年 (c) 2016年 (d) 2017年

图7 大通回族土族自治县城关镇大庄滑坡影像对比

Fig. 7 Image comparison of Dazhuang landslide in Chengguan, Datong

土方量达30万m³,导致62户村民耕地被毁,1家沙场、1家信鸽养殖场和1家砖瓦厂设施被掩埋,事故造成直接经济损失达131万元。通过多期遥感影像对比分析可知,城关镇砖瓦厂在2003年以前已经开始运营,随着砖瓦厂在斜坡坡脚取土日益增加,坡脚遭到破坏,导致2016年发生了滑坡。2017年遥感影像上滑坡特征明显,可见滑坡后壁、滑坡台阶、后缘洼地、后缘拉裂缝、横向裂缝和滑坡舌等微地貌,滑坡周界清晰,滑坡体长为750 m,宽为480 m,平面面积为4.4万m²,呈不规则形状,主滑方向为185°;该滑坡体上部为巨厚层黄土,下部为新近纪泥岩、粉砂岩。城关镇砖瓦厂切坡取土破坏了斜坡的结构和完整性,使原本较陡的斜坡临空面增大,整个斜坡从前缘向后山逐次卸荷—拉裂—牵引并渐进发展,形成整体性滑坡险情^[23],再加上降雨入渗,最终导致了该滑坡的发生。

区内其余的108处地质灾害变化点为已实施工程治理或搬迁治理的地质灾害点。如图8所示,西宁市林家崖滑坡区的坡体上部进行了削坡处理,修建了梯形的护坡,坡脚居民进行了整体搬迁,建筑物进行了拆除,降低了地质灾害所带来的危害。

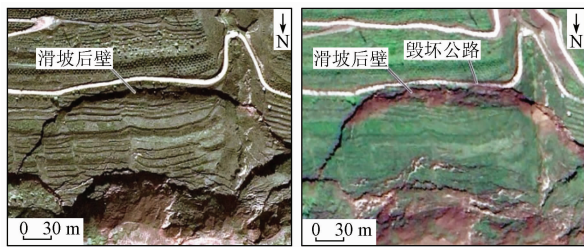


(a) 2010年 (b) 2017年

图8 西宁市林家崖滑坡治理前后影像对比
Fig. 8 Image comparison of Linjiaya landslide before and after treatment in Xining

4.3 地层岩性与地质灾害变化

统计分析发现,区内125处地质灾害动态变化点(不含108处地质灾害治理点),分布于第四纪黄土中的灾害变化点72处(图9),所占比例约57.60%;分布于新近纪—古近纪红色砂岩、泥岩中的灾害变化点35处,所占比例28.00%;分布于其他地层中的灾害变化点仅8处,所占比例6.40%。由此可见地质灾害发生、发展最为活跃的地区为第四纪黄土覆盖区,其次为新近纪—古近纪泥岩区,基岩区地质灾害分布相对较少,也相对较为稳定。说明导致区内斜坡不稳定的地层岩性因素,是分布广、厚度大的新近纪—古近纪含有泥岩、石膏、碎屑岩及第四纪黄土,这是研究区崩塌滑坡最主要的物质来源。



(a) 2011年

(b) 2013年

图9 西宁市城西区汉庄小区滑坡前后对比

Fig. 9 Comparison before and after landslide in Hanzhuang, Chengxi, Xining

4.4 地质构造与地质灾害变化

区内125处(不含地质灾害治理点)地质灾害变化点中仅有59处(47.20%)与断裂构造的关系不明显;其余的66处地质灾害变化点(52.80%)多沿断裂分布。说明断裂活动在一定程度上影响着地质灾害的发生、发展。

研究区为新构造作用下的新生代断陷盆地,边界断裂及盆地内次级断裂的早期活动,控制了区内地形地貌、地质构造和地层岩性等,并致使区内岩石(泥岩、粉砂岩、砂砾岩)中的节理、裂隙发育,为地质灾害的形成、发展提供了地质构造、地层岩性等条件。如西宁市城西区张家湾滑坡,2011年遥感影像显示后壁处存在一处较新的小滑坡体,滑坡体上植被稀疏,发育横向纹理,呈舌形。2012年影像显示滑坡后缘失稳,发生了新的滑动,宽度约120m,滑坡后壁向后移动5~20m。2014年滑坡西部发生小型崩塌现象。该滑坡沿湟水河隐伏断裂分布(图10),在张家湾一带,断层构成山前高台地与山麓冲洪积、坡积带的分界,高15m的冲沟阶地由含砾黄土构成,超覆于桔红色新近纪泥岩之上。该断层发育在新近纪泥岩中,断错新近纪地层约5m,断层上覆连续稳定的第四纪沉积物,厚约10m。晚更新世



图10 西宁市城西区张家湾滑坡遥感解译

Fig. 10 Remote sensing interpretation of Zhangjiawan landslide in Chengxi, Xining

以来未见活动迹象^[24]。但该断层造成了张家湾地区断层所控制的新近纪地层及湟水河Ⅲ级阶地岩土体破碎、松散、节理发育等,导致岩土体失稳。同时,由于西宁盆地经历多次隆升和沉积,盆地内发育多级阶地,使得西宁张家湾地区边坡坡度较大,造成边坡不稳,易于滑动。

5 结论

本文基于地质灾害遥感调查与监测,结合孕灾背景参数进行统计分析,探讨了湟水流域内地质灾害发生、发展与地质环境、自然因素和人类活动的关系。研究表明:

1) 研究区内有崩塌和滑坡体等地质灾害点共3188处,主要分布于第四纪黄土区与新近纪—古近纪碎屑岩区。新构造运动的大幅度差异性隆升及盆地内沉积的泥、砂岩互层结构含盐地层及巨厚层黄土应是本区地质灾害密集发育的内部条件。

2) 2009—2017年间区内共发生变化的地质灾害点233处。其中,降雨等自然因素引发灾害发生变化19处,集中发生于降雨充沛的7—8月份。因人类工程活动所导致的地质灾害变化有214处,人类工程活动诱发了地质灾害的发生、发展,还存在正向影响作用。灾害变化点主要分布于第四纪黄土覆盖区,新近纪—古近纪碎屑岩区和基岩区。研究表明青海省湟水流域地质灾害发生程度、规模、数量和发展趋势受降雨、人类工程活动和岩石构造单元的影响。

3) 随着国产高分卫星的陆续发射,利用国产高分影像开展地质灾害动态监测具有明显的优势。通过地质灾害分布规律、动态变化的遥感地质分析可以深化基于地质环境、自然因素和人类活动与地质灾害变化的理论研究,提升应对地质灾害发生的能力与水平,使防灾减灾工作更具针对性、有效性。

参考文献 (References):

- [1] 刘峰, 陈惠娟, 王士东, 等. 西宁市主要地质灾害成因及变形破坏模式分析[J]. 地下水, 2015, 37(3): 175-177.
Liu F, Chen H J, Wang S D, et al. Analysis on main geological disasters formation causes and deformation failure mode in Xining [J]. Ground Water, 2015, 37(3): 175-177.
- [2] 李宏杰, 戴福初, 许领, 等. 地质灾害调查中 ETM+ 与 SPOT 5 Pan 影像融合与评价[J]. 国土资源遥感, 2008, 20(1): 43-45, 54. doi:10.6046/gtzyyg.2008.01.09.
Li H J, Dai F C, Xu L, et al. The assessment of fused image of ETM+ and SPOT 5 Pan in the investigation of geological hazards [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2008, 20(1): 43-45, 54. doi:10.6046/gtzyyg.2008.01.09.

- [3] 曾磊, 黄玉华. 黄土高原河谷演变与地质灾害发育规律研究——以陕西省子长县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(3): 67-72.
Zeng L, Huang Y H. Valley evolution and geologic hazard occurrences in the Loess Plateau of China: A case study: Zichang County in the northern Loess Plateau of Shaanxi Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(3): 67-72.
- [4] 朱静, 唐川. 遥感技术在我国滑坡研究中的应用综述[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(3): 458-464.
Zhu J, Tang C. An overview of remote sensing applications for landslide research in China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(3): 458-464.
- [5] 范敏, 孙小飞, 苏凤环, 等. 国产高分卫星数据在西南山区地质灾害动态监测中的应用[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(s1): 85-89. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. s1. 14.
Fan M, Sun X F, Su F H, et al. Application analysis of remote sensing dynamic monitoring for geological hazards in southwest mountainous areas using domestic high resolution satellite data[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(s1): 85-89. doi: 10.6046/gtzyyg. 2017. s1. 14.
- [6] 刘肖妮, 梁树能, 吴小娟, 等. “高分二号”卫星数据遥感滑坡灾害识别研究——以云南东川为例[J]. 航天返回与遥感, 2015, 36(4): 93-100.
Liu X J, Liang S N, Wu X J, et al. Interpretation of landslide in Dongchuan District of Yunnan Province using GF-2 satellite data[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2015, 36(4): 93-100.
- [7] 张焜, 李晓民, 马世斌, 等. GF-1 图像在中印边境楚鲁松杰村地质灾害调查中的应用[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(2): 139-148. doi:10.6046/gtzyyg. 2016. 02. 22.
Zhang K, Li X M, Ma S B, et al. Application of GF-1 image to geological disaster survey in Cosibsumgy village on Sino-India border area[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(2): 139-148. doi:10.6046/gtzyyg. 2016. 02. 22.
- [8] 郑雄伟, 杨金中, 陈玲, 等. 国土资源卫星地质矿产应用成效[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(s1): 1-7. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. s1. 01.
Zheng X W, Yang J Z, Chen L, et al. A review on the effects of applying land and resources satellites to geology and mineral resources[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(s1): 1-7. doi:10.6046/gtzyyg. 2017. s1. 01.
- [9] 刘小玉. “基于国产卫星的地质灾害调查系统”在黄土滑坡区的示范应用研究[J]. 西北地质, 2017, 50(2): 250-258.
Liu X Y. “The geological hazard investigation system based on domestic satellite”: Demonstration and application in the loess landslide area[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(2): 250-258.
- [10] 张雪峰, 何政伟, 薛东剑, 等. 汶川地震大型单体滑坡遥感调查与危险性评价[J]. 遥感信息, 2011(3): 50-54.
Zhang X F, He Z W, Xue D J, et al. Remote sensing investigation and risk assessment of large scale individual landslide triggered by the Wenchuan earthquake[J]. Remote Sensing Information, 2011(3): 50-54.
- [11] 张路路, 刘召芹, 刘峰, 等. 基于数字高程模型的古滑坡区提取[J]. 遥感信息, 2015, 30(6): 37-41.
Zhang L L, Liu Z Q, Liu F, et al. Extraction of ancient landslide based on DEM[J]. Remote Sensing Information, 2015, 30(6): 37-41.
- [12] 贾伟洁, 王治华. 基于高分辨率遥感影像的滑坡活动特征及稳定性分析——以东苗家滑坡为例[J]. 国土资源遥感, 2019, 30(6): 174-181. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 04. 23.
Jia W J, Wang Z H. Activity characteristics and stability analysis based on high-resolution remote sensing image: A case study of Dongmiaojia landslide[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 30(6): 174-181. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 04. 23.
- [13] 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. Remote sensing image features of typical landslides[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(1): 86-92. doi:10.6046/gtzyyg. 2013. 01. 16.
- [14] 刘志中, 宋英旭, 叶润青. 渝东北2014年“8·31”暴雨诱发滑坡遥感解译与分析[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(4): 192-199. doi:10.6046/zrzyyg. 2020348.
Liu Z Z, Song Y X, Ye R Q. An analysis of rainstorm-induced landslide in northeast Chongqing on August 31, 2014 based on interpretation of remote sensing images[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(4): 192-199. doi: 10.6046/zrzyyg. 2020348.
- [15] 郭兆成, 聂洪峰, 杨亮, 等. 鹤庆盆地东缘古滑坡遥感识别与特征研究[J]. 现代地质, 2014, 28(5): 1068-1076.
Guo Z C, Nie H F, Yang L, et al. Ancient landslide identification and characteristics using remote sensing along eastern edge of the Heqing basin[J]. Geoscience, 2014, 28(5): 1068-1076.
- [16] 邱海军, 胡胜, 崔鹏, 等. 黄土滑坡灾害空间格局及其空间尺度依赖性研究[J]. 第四纪研究, 2017, 37(2): 307-318.
Qiu H J, Hu S, Cui P, et al. Pattern analysis of loess landslides and their scale dependency[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(2): 307-318.
- [17] 杨玲, 权开兄, 代庆礼, 等. 西宁市重大地质灾害隐患分布规律研究[J]. 青海环境, 2015, 25(3): 113-121.
Yang L, Quan K X, Dai Q L, et al. Study on the distribution law of major geological hazards in Xining City[J]. Environment of Qinghai, 2015, 25(3): 113-121.
- [18] 邓中林, 侯元才, 古风宝, 等. 青海东北部第三纪西宁—贵德—化隆盆地充填特征. 抱粉组合方式与古气候变化[J]. 青海地质, 2000, 9(1): 43-53.
Deng Z L, Hou Y C, Gu F B, et al. Filling characteristics, sporopollen assemblage and palaeoclimate variation of tertiary basins in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Qinghai Geological, 2000, 9(1): 43-53.
- [19] 魏林森, 丁宏伟, 王婷, 等. 降水对陇西黄土滑坡的诱发作用及时空影响分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(3): 609-615.
Wei L S, Ding H W, Wang T, et al. Loess landslide in Longxi of Gansu Province: Precipitation induced function and space-time effect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(3): 609-615.
- [20] 朱立峰, 谷天峰, 胡炜, 等. 灌溉诱发黄土滑坡的发育机制研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 485-491.
Zhu L F, Gu T F, Hu W, et al. Developmental mechanism of irrigation-induced loess landslides[J]. Journal of Engineering Geolo-

- gy, 2016, 24(4): 485 - 491.
- [21] 彭建兵, 吴迪, 段钊, 等. 典型人类工程活动诱发黄土滑坡灾害特征与致灾机理[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 971 - 980.
- Peng J B, Wu D, Duan Z, et al. Disaster characteristics and destructive mechanism of typical loess landslide cases triggered by human engineering activities [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 971 - 980.
- [22] 吴玮江, 叶伟林, 姚正学, 等. 甘肃永靖黑方台 4·29 罗家坡黄土滑坡的特征[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 662 - 670.
- Wu W J, Ye W L, Yao Z X, et al. Characteristics of the Luojiapo loess landslides at Heifangtai, burst on April 29, 2015, in Yongjing County, Gansu Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 662 - 670.
- [23] 刘传正. 城镇建设中的地质环境科学利用问题[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 1 - 7.
- Liu C Z. Some problems of land use in urbanization of mountainous area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(4): 1 - 7.
- [24] 李智敏, 张进, 田勤俭, 等. 西宁湟水河隐伏断裂发育模式探讨[J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1245 - 1250.
- Li Z M, Zhang J, Tian Q J, et al. A discussion on the development model of the concealed fault along the Huangshui River in Xining [J]. Geology in China, 2009, 36(6): 1245 - 1250.

Remote sensing monitoring of the dynamic changes in geologic hazards in the Huangshui River basin of Qinghai Province

XIN Rongfang^{1,2,3,4}, LI Zongren^{1,2,3,4}, ZHANG Kun^{1,2,3,4},
ZHANG Xing^{1,2,3,4}, HUANG Li^{1,2,3,4}, LIU Baoshan^{1,2,3,4}

(1. Institute of Geological Survey of Qinghai Province, Xining 810012, China; 2. Qinghai Remote Sensing Big Data Engineering Technology Research Center, Xining 810012, China; 3. Qinghai Satellite Application Technology Center for Natural Resources, Xining 810012, China; 4. The Northern Qinghai - Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources Laboratory, Xining 810012, China)

Abstract: This study investigated the causes of the frequent occurrence of geologic hazards in the Huangshui River basin of Qinghai Province in recent years mainly using the GF - 1 and GF - 2 satellite remote sensing data. Based on the comparative monitoring of multi - source, multi - temporal, and multi - period remote sensing images and the support of geoscience knowledge, this study built a detailed and reliable spatial distribution database of geological hazards through the sorting, analysis, and screening of existent geologic hazard data of the study area, the laboratory interpretation of remote sensing images, and field investigation and verification. Then, it conducted a statistical analysis using the spatial analysis module of GIS and the parameters of geologic hazards. Finally, this study explored the relationships between the occurrence of geologic hazards and geological environment, natural factors, and human activities. The results are as follows. In 2017, 3 188 sites of geologic hazards such as collapse and landslide were discovered in the study area. A total of 233 geologic hazard sites have changed since 2009. Among the formation conditions of geologic hazards, the geological environment conditions have changed slowly, while human engineering activities and rainfall have been the most active factors, which jointly induced geologic hazards.

Keywords: geological disasters; Huangshui River basin; dynamic change; remote sensing monitoring; change analysis

(责任编辑: 张 仙)