doi: 10.6046/gtzyyg.2017.s1.12
引用格式: 李健强,韩海辉,高婷,等. 资源三号卫星在地质灾害调查评价中的应用——以宝鸡黄土区为例[J]. 国土资源遥感,2017,29(s1):73-80. (Li J Q, Han H H, Gao T, et al. The application of ZY,3 satellite to geological hazards survey and evaluation: A case study of Baoji loess area[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(s1):73-80.)

资源三号卫星在地质灾害调查评价中的应用
——以宝鸡黄土区为例

李健强, 韩海辉, 高 婷, 杨 敏, 梁 楠
(中国地质调查局西安地质调查中心,西安 710054)

摘要: 国产卫星特别是国产高分辨率卫星的发展为地质调查领域的卫星遥感应用研究注入了新的活力,展现了良好的应用效果。利用所获取的宝鸡地区 2013 年和 2014 年 2 a 的资源三号卫星(ZY-3)影像数据,开展地质灾害体调查,同时提取了地形地貌、活动断裂、水系、植被、人工工程等孕灾环境因子信息,并结合宝鸡地区岩(土)体数据、降雨量数据利用信息量模型开展地质灾害易发性、危险性评价。结果表明,此次应用为黄土滑坡区利用国产高分辨率卫星开展地质灾害调查、监测与评价提供了一个良好的示范作用。

关键词: 资源三号(ZY-3); 地质灾害; 调查评价; 宝鸡
中图法分类号: TP 79　**文献标志码:** A　**文章编号:** 1001-070X(2017)s1-0073-08

0 引言

西北地区东部是我国地质灾害危害程度较高地区之一,主要是受黄土引起的滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害影响[1]。据不完全统计,2002—2012 年间,我国地质灾害中有近 1/3 发生在黄土地区[2-3],而这些地质灾害又以黄土滑坡、崩塌和泥石流为主,时常造成人员伤亡和巨大的经济损失[4-9]。

我国黄土区面积广大,地形复杂,若单纯依靠地面调查,周期长且难以完整覆盖。而利用高分辨率的遥感数据进行地质灾害调查,不仅易于识别、覆盖全面,还能缩短时间,提高工作效率。近年来,随着我国航天事业的长足发展,以及资源和环境探测需要的增长,我国发射了一系列资源、环境等观测卫星,这为我国地质灾害调查与监测提供了强大的技术支撑。

本研究旨在利用国产高分辨率卫星(简称"高分卫星")遥感数据开展针对典型黄土滑坡区的地质灾害调查、监测与评价试验,探索基于国产卫星的地质灾害调查监测技术方法和流程并开展示范应用。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

宝鸡地区(图 1)位于秦岭—六盘山山地、陕北黄土高原和渭河平原交汇部位,区内地貌类型有黄土丘陵、黄土台塬、山间黄土盆地、谷地、冲洪积平原 5 种类型。宝鸡地区基岩山区约占总面积的 54%;黄土丘陵、黄土台塬、黄土盆地约占 42.7%。黄土区主要位于宝鸡地区的中部和东北大部。

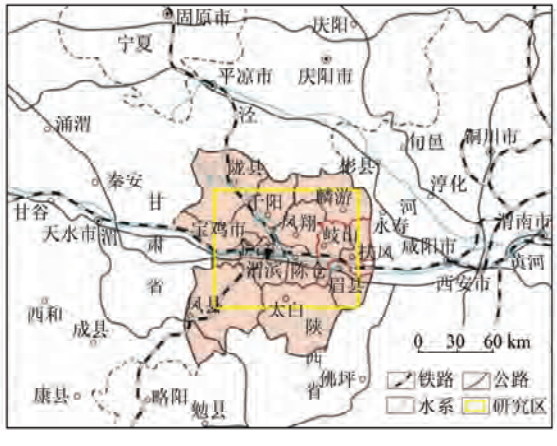


图 1 研究区交通位置图

Fig. 1 Traffic location map of the study area

收稿日期: 2017-06-01; **修订日期:** 2017-07-05
基金项目: 国家发展和改革委员会卫星及应用产业发展专项"基于国产卫星的地质灾害调查检测系统研制与示范应用"(编号: 发改办高技[2012]2083 号)和中国地质调查局地质调查项目"黄河中游地区国土遥感综合调查"(编号: 12120115064601)共同资助。
第一作者: 李健强(1973-),男,教授级高工,主要从事遥感地质方面的研究。Email: 405739307@qq.com。

宝鸡地区属典型的暖温带半湿润大陆季风气候区,多年平均降雨量在 600 mm 以上,部分年份可达 1 000 mm 以上,日最大降雨量达 169.7 mm(1980 年 8 月 23 日)。区内降水量年内分配不均,降雨的特点多为连阴雨、暴雨或连阴雨加暴雨,60% ~70% 降水量集中在 6—9 月份。

宝鸡地区是我国有名的滑坡灾区,特殊的山、川、塬地质地貌特点极容易引发崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害[5]。宝鸡市最具代表性的地质灾害类型包括滑坡、崩塌、泥石流及不稳定斜坡,其中滑坡灾害数量最多。在黄土台塬(梁)的边缘、秦岭山前、大型河谷沿岸等区域极易发生地质灾害。集中的大暴雨或连阴雨是宝鸡黄土区地质灾害形成的主要诱发因素[10-11],而随着人类工程活动不断扩展,不合理的人类工程活动导致人为诱发的地质灾害呈上升趋势,严重威胁群众生命及财产安全。

1.2 数据源

利用国产资源三号卫星(ZY -3)遥感数据开展研究。ZY -3 是中国第一颗自主的民用高分辨率立体测绘卫星[12],搭载了 4 台光学相机,具体参数如表 1 所示。其拥有较高分辨率多光谱数据和立体观测能力,为地质灾害体及其孕灾环境的遥感调查与监测提供了可能。

表 1 ZY -3 有效载荷技术指标

Tab. 1 Payloads parameters of ZY -3 satellite

有效载荷	波段号	光谱范围/μm	空间分辨率/m	幅宽/km	侧摆能力/(°)	重访周期/d
前视相机	-	0.50 ~0.80	3.5	52	±32	3 ~5
后视相机	-	0.50 ~0.80	3.5	52	±32	3 ~5
正视相机	-	0.50 ~0.80	2.1	51	±32	3 ~5
多光谱相机	1	0.45 ~0.52	6.0	51	±32	5
	2	0.52 ~0.59				
	3	0.63 ~0.69				
	4	0.77 ~0.89				

试验数据为宝鸡地区 2013 年、2014 年的 1A 级数据。首先利用其正视数据和后视数据提取相对高程得到 DEM 数据(以卫星地势面为基准),然后利用提取的 DEM 分别对全色影像和多光谱影像进行正射纠正,再经过融合及镶嵌处理得到解译所用的基础影像。

2 地质灾害体遥感解译

在 ZY -3 模拟真彩色影像上,黄土区各类地质灾害体的遥感特征和判别标志较为明显,这为地质灾害体遥感调查奠定了基础。

2.1 滑坡遥感判别标志

滑坡一般具有陡峭的滑坡壁和缓倾的滑坡体,坡体发生转折(图 2),滑坡体下滑形成弧形凸出的

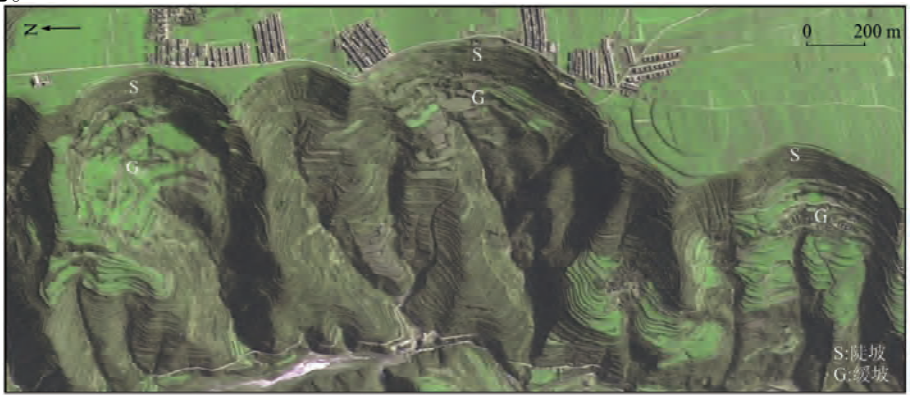


图 2 滑坡面的陡坡和缓坡系统(金台区碶石沟)

Fig. 2 Steep slope and gentle slope of landslide surface

滑坡舌,滑坡内侧常有完整、不完整的弧形拉张谷地,形成双沟同源,在等高线上亦有明显的反映,表现为滑坡后壁等高线密集,滑坡体等高线稀疏(图 3);受后期自然或人为破坏严重的滑坡,滑坡后壁、



(a) 等高线特征 (b) 影像图

图 3 滑坡后壁和滑坡体的等高线特征

Fig. 3 Contour characteristics of landslide wall and landslide body

滑坡体可能不明显,不易识别。

沿滑坡体的边缘常由于含水性的增强而色调相对较暗并沿滑坡的后缘分布洼地,滑坡体两侧的自然沟切割较深; 滑坡体后缘发育有弧形影像,包括陡坎、地形变异线、色调异常线等,而前缘边坡向谷地凸出,常有地形微突起及小型崩塌滑坡堆积影像特征。在遥感影像上,新滑坡体显示较均匀的灰白色,老滑坡体显示较均匀的深棕绿色调,形状有簸箕形、舌形、弧形和不规则形等,影像上基本可识别滑坡壁、滑坡台阶、封闭洼地、滑坡舌等特征。

2.2　崩塌遥感判别标志

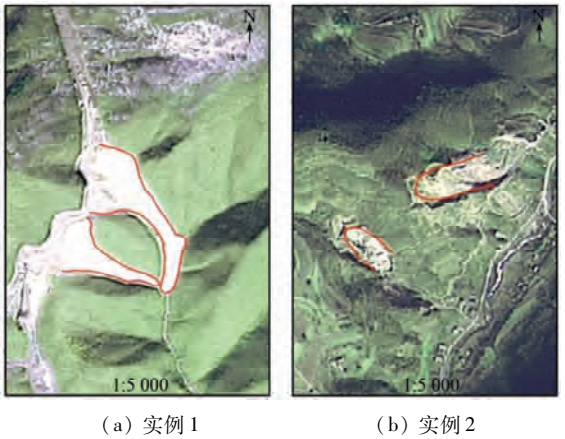
崩塌受地形地貌、构造和岩性条件制约明显。崩塌体后缘发育有直线形或弧形陡峭山崖与绝壁,在遥感影像上阳坡为浅色调区块、阴坡呈现浓重的阴影区带; 崩塌体多呈"片帮式"沿陡壁连续分布。古崩塌体影像粗糙,微地貌起伏不平,地表植被覆盖往往呈从状; 现代崩塌体呈浅色调不规则斑块影像,往往成群成带分布(图 4)。



图 4　崩塌地质灾害遥感影像图(2013 年 ZY－3)
Fig. 4　Remote sensing image of collapse geological hazard (ZY－3, 2013)

2.3　泥石流遥感判别标志

泥石流在影像上多呈不对称的哑铃状(图 5)。



(a) 实例 1　　(b) 实例 2

图 5　泥石流地质灾害遥感影像图
Fig. 5　Remote sensing image of mud slides geological hazard

泥石流形成区一般呈瓢形、条带状或树枝状,松散物丰富,常见滑坡、崩塌产生; 通过区沟床较直,沟谷一般较窄; 堆积区多位于沟谷出口处,纵坡平缓,呈扇状或锥状影像,轮廓明显,浅色调,扇面无固定沟槽,多呈漫流状态。早期泥石流沟谷多呈灰暗的粗糙条,堆积物往往分布于沟口,呈现扇形,而近期泥石流沟谷多呈亮白色线状,影纹均匀,植被不发育。

2.4　不稳定斜坡遥感判别标志

研究区不稳定斜坡主要分布于公路沿线的人工岩质边坡地带,数量较多。影像呈白色明亮色彩,含水区域颜色偏紫红色,影纹一般较为均匀,人工开挖形迹明显,形状有弧形和不规则形,与周围地物区分明显(图 6)。

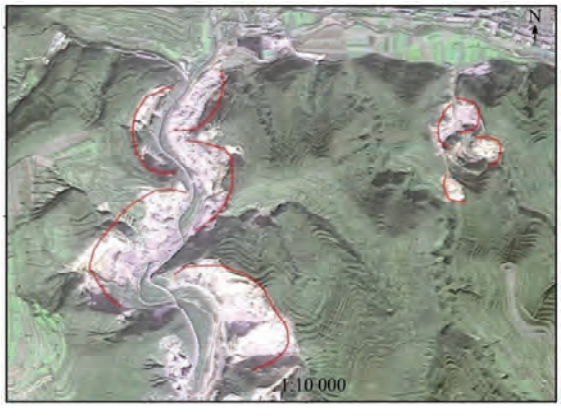


图 6　不稳定斜坡地质灾害遥感影像图
Fig. 6　Remote sensing image of unstable slope geological hazard

利用 2013 和 2014 年度的 ZY－3 数据,在 1:50 000比例尺上,结合前人调查成果,共解译地质灾害 973 处(滑坡 582 处,崩塌 206 处,泥石流 43 处,不稳定斜坡 142 处)(图 7)。而在宝鸡市区北坡在 1:25 000 比例尺上解译出滑坡 53 处,滑塌 1 处(图 8)。

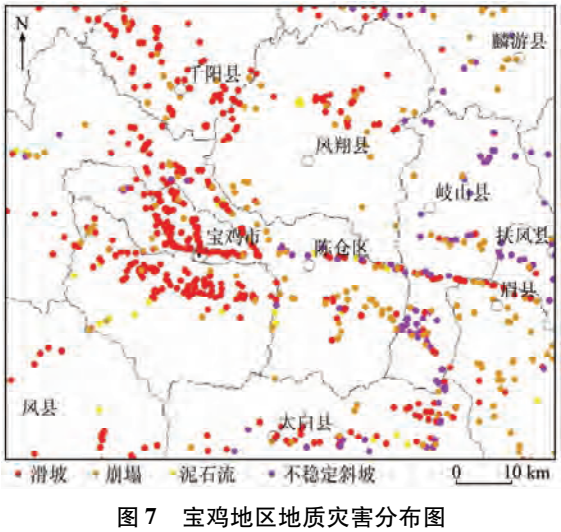


图 7　宝鸡地区地质灾害分布图
Fig. 7　Distribution map of geological hazards in Baoji area

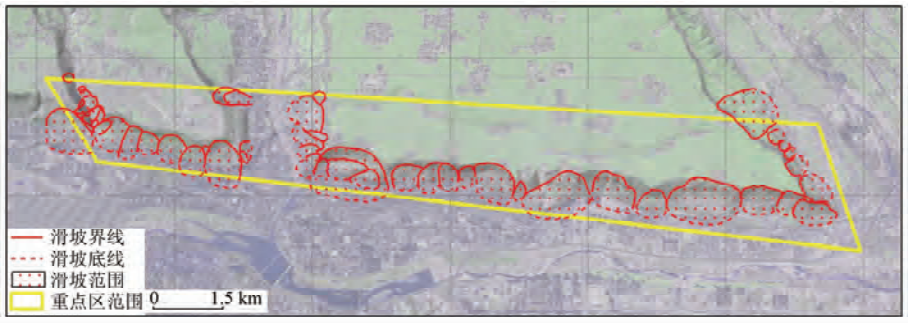


图 8 宝鸡市区北坡滑坡灾害分布图

Fig. 8 Distribution map of landslide in north slope, Baoji urban area

3 地质灾害孕灾环境调查

3.1 地形地貌因子调查

地貌类型的差异往往反映在地形地貌因子的发育程度上,从而影响着地质灾害的孕育、发生与发展。利用提取的 ZY－3 DEM 数据,分别计算地面坡度、坡向、水系(沟壑)密度等地形地貌因子。

地面坡度直接影响着地表物质与能量的再分配,是直接影响地质灾害发生的关键因子。在黄土区,由于黄土成分相对均匀、固结程度差,地面坡度还影响着水流速度、渗透量、径流量等,因此地面坡度区对黄土地质灾害的发生起着关键性的作用。以 250 m 为邻域进行空间邻域分析,宝鸡黄土区地形起伏度特征如下:区域内坡高介于 0～547 m 之间,各地貌单元有差异。其中,渭河盆地内部地形起伏最小,平均 72 m,北部黄土丘陵地形起伏度在 112 m,西南部基岩山区地形起伏 246 m 左右(图 9)。

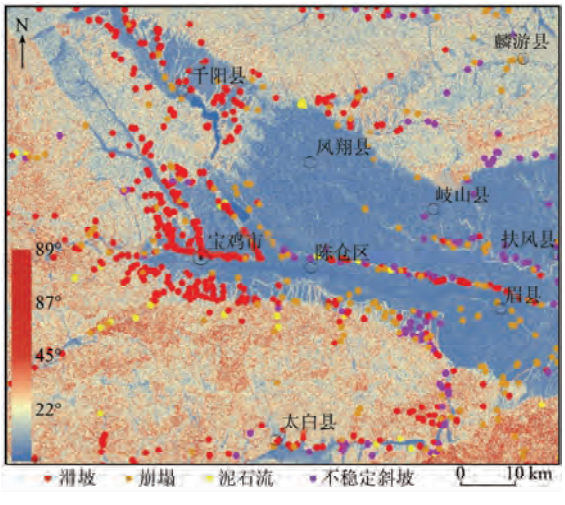


图 9 宝鸡地区坡度图

Fig. 9 Slope map of Baoji area

地面坡向(图 10)直接影响着地面太阳光能量分配及土壤含水情况、植被生长状况和地表径流流向,是区域斜坡失稳机制中不可忽视的地形特征要素之一。研究表明,阳坡具有偏南地区的气候特点,而阴坡则具有偏北地区的气候特点[13]。宝鸡地区滑坡主要分布在阳坡地带,说明阳坡较之阴坡更易诱发滑坡灾害。

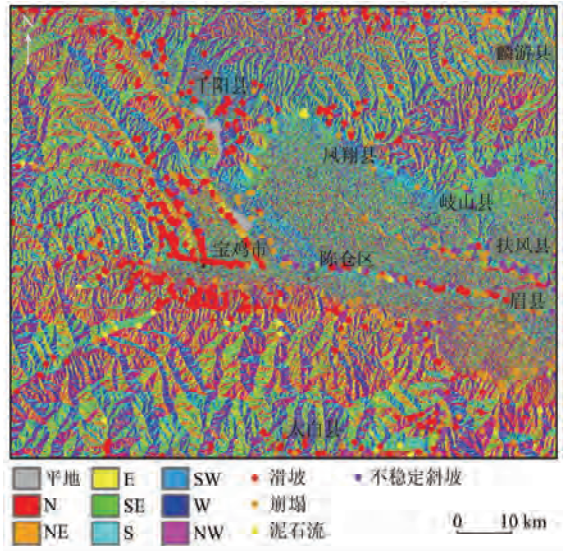


图 10 宝鸡地区坡向图

Fig. 10 Aspect map of Baoji area

水系(沟壑)密度,水系分布同样影响着灾害的发生,河流对河谷岸坡的侵蚀包含下切和侧蚀 2 种作用,影响了斜坡的稳定性。对宝鸡市主要河流两岸 1 000 m 范围内进行统计分析,计算结果表明:干流的影响区在 800 m 以内,超过 800 m,灾害数明显下降。

3.2 活动断裂因子解译

解译认为,研究区新构造运动强烈,伴随北秦岭山脉的隆升和渭河盆地的沉降形成了一系列不同规模、不同方向的活动断裂。活动断裂主要表现为近 EW 向和 NW 向,多属区域性活动断裂伴生的次级断裂,对地段微地貌、水系和冲沟的展布都有显著的控制作用。尤其是在渭河盆地中,以正断层为主的活动断裂常切割渭河阶地和黄土塬边形成规模宏大的高陡边坡,并制约滑坡地质灾害的分布。分析发现,断裂的内动力变化引起了其邻域灾害的高密度

分布,距断裂 300 m 内灾害点分布最为密集,而后逐渐递减。

3.3 水系因子提取

水系的形态与地形地貌、线性构造之间存在极强的相关性,对地质灾害的分布具有明显的指向作用。解译发现,泾河水系主要表现为树枝状水系,表明研究区内泾河流域为微倾斜平原,地壳相对稳定,其岩性比较均一,岩层倾角小; 渭河水系则呈现为羽毛状水系,表明其为断陷谷地或线状褶皱地区。本次利用 ZY -3 DEM 分析计算了区内河网密度、河流分歧率和河流弯曲系数等水系因子。

计算表明研究区河网密度为 1.31 km/km^2,属河网密度较大区域。水系分歧率平均值为 5.27,说明渭河流域受地质构造(线性构造)的影响较大。渭河水系在研究区内总体形态为羽毛状水系,与实地调查结果相符。

3.4 植被因子提取

植被覆盖状况是生态地质环境的敏感因子,对地形地貌各因子均具有一定的影响。如在植被稀疏地区,因水土流失造成地形坡度变陡等。研究结果表明,植被覆盖状况对地质灾害的分布具有一定的指向作用。

在遥感应用领域,植被覆盖状况常以归一化植被指数(nomalized difference vegetation index,NDVI)表示,即近红外波段反射值与红光波段反射值之差与和的比值,其数学表达式为

$$NDVI = (NR - R)/(NR + R) , \qquad (1)$$

式中: NR 和 R 分别为近红外和红光波段反射值。

利用 ZY -3 多光谱数据提取 $NDVI$(图 11),即利用 ZY -3 的近红外波段(B4:770 ~ 890 nm)和红光波段(B3:630 ~ 690nm),计算得到$NDVI$。$NDVI<0$ 表示地面覆盖为云、水、雪等; $NDVI=0$ 值表示裸地、裸岩; $NDVI>0$ 表示有植被覆盖,且随着覆盖度提高而增大。植被指数与灾害相关性分析表明,灾点高密度区明显集中在植被覆盖较差地区,即 $NDVI$ 低值区(0.06 ~ 0.40)。

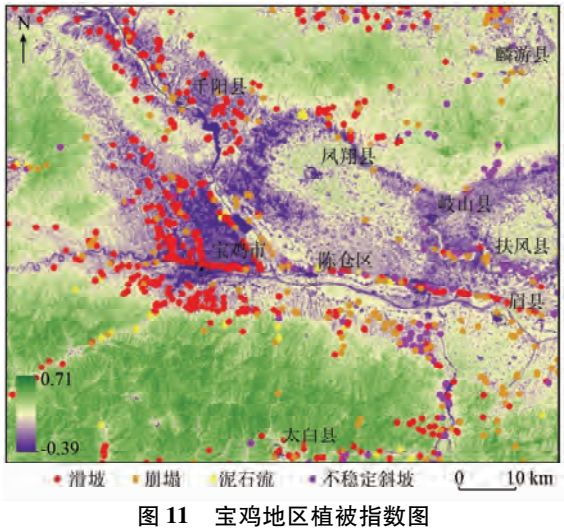


图 11　宝鸡地区植被指数图

Fig. 11　NDVI map of Baoji area

3.5 人类工程活动

人类工程活动已经成为不可忽视的巨大营力,程度不等地改变了地质环境的条件,打破了千百年来自然界在缓慢侵蚀、堆积过程中形成的动态平衡,诱发或加剧了地质灾害。研究区与地质灾害相关的工程活动主要有农耕、建窑、修路、采煤、砂石开采等,而道路建设影响最为广泛。路网沿线切坡是与地质灾害发育相关最强烈的工程活动,为地质灾害的发生埋下了许多隐患。本次主要利用 ZY -3 影像数据提取了路网信息并分析路网与灾害点的关系。选取县市主干道路,包括高速公路、国家干线公路、省级干线公路等车流、人流高的公路进行地质灾害相关性的研究,计算表明距公路 60 m 以内是地质灾害易发区。

4 地质灾害综合评价分析

在区域地质灾害遥感解译及孕灾因子提取的基础上,对研究区的地质灾害易发性、危险性进行了综合评估分析。易发性评价利用地质构造、地形地貌、河流和植被等几大类影像因子分析评价了宝鸡黄土区地质灾害发育程度,从空间上分析区内不同地段未来发生地质灾害的倾向性; 危险性评价是在易发性基础上,主要考虑降雨、人类工程活动等致灾诱因,分析评价地质灾害发生的概率及其扩展和影响范围。评价方法采用信息量模型进行分析。

4.1 信息量模型简介

信息量模型属于贝叶斯概率模型(或者双变量分析)的一种,利用概率形式进行定量描述,反映了不同成灾要素区间对地质灾害形成的贡献大小,地质灾害信息量 $I_{Aj\to B}$ 可表示为

$$I_{Aj\to B} = \ln \frac{P(B/A_j)}{P(B)}, \quad j = 1,2,\cdots,n , \qquad (2)$$

式中: $P(B/A_j)$ 为成灾要素 A 中第 j 区间的地质灾害 B 的发生概率; $P(B)$ 为地质灾害 B 发生概率的区域背景值; $I_{Aj\to B}$ 为地质灾害信息量值(Nat); n 为成灾要素 A 被划分为的次级区间数。

在实际操作中为了便于计算,通常将式(2)中概率转化成样本频率进行计算,于是可变换为

$$I_{Aj\to B} = \ln \frac{P(B/A_j)}{P(B)} = \ln \frac{N_j/S_j}{N/S}, \ j = 1,2,\cdots,n , \quad (3)$$

式中：$I_{Aj\to B}$为成灾要素 A 中第 j 区间地质灾害 B 发生的信息量；N_j 为成灾要素 A 中第 j 区间的地质灾害面积值或灾点数；S_j 为成灾要素 A 中第 j 区间的分布面积；N 为区域地质灾害的总分布面积或总灾点数；S 为区域总面积。

4.2 易发性评价

评价内容包括地质灾害特征空间密度易发条件和潜在易发区预测，主要环境影响因素包括：地质构造、工程地质岩组、斜坡结构类型、地形地貌和水文地质条件等因素。通过对活动断裂、地层岩性、地形地貌、河流水系及植被指数 5 类影响因素与 5 种具体要素信息量值计算排序（表 2）。将所有要素分别划分为 3 ~ 10 个要素区间，共计 32 个要素区间分别进行信息量计算，并按照信息量值由大到小进行排序，以揭示不同要素区间对崩滑流地质灾害的致灾效应的强弱程度。

表 2 地质灾害易发程度影响因素信息量计算结果

Tab. 2 Calculation results of influence factor information quantity for susceptibility degree of geological hazards

序号	一般分类	具体要素	要素区间	计算参数		信息量	
				灾点 N_j/处	S_j/km^2	I/Nat①	排序
1	地质构造	活动断裂/m	[0,300]	127	493.09	0.98	4
2			(300,600]	91	489.21	0.66	7
3			(600,1 000]	46	643.92	−0.30	23
4	地层岩性	工程岩组	冰碛物冰水堆积	7	44.25	0.49	10
5			冲积洪积卵砾石层	95	756.01	0.26	15
6			老滑坡堆积体	29	13.28	3.12	2
7			风积黄土 Q3	499	3 829.05	0.30	14
8			老黄土(Q1 − Q2)	9	2.77	3.52	1
9			层状含软弱层碎屑岩组	17	217.64	−0.21	21
10			次坚硬板片状变质岩组	1	25.09	−0.89	28
11			次坚硬层状浅变质 − 碎屑岩组	1	40.60	−1.37	29
12			软弱层状碎屑岩组	11	78.04	0.38	12
13			坚硬层状碎屑岩组	80	1 028.44	−0.22	22
14			坚硬层状碳酸岩组	39	446.15	−0.10	20
15			坚硬块状变质岩、侵入岩组	178	3 589.22	−0.67	25
16	地形地貌	地形坡度/(°)	[0,10]	45	4 289.65	−2.22	31
17			(10,15]	64	1 548.56	−0.85	27
18			(15,20]	92	1 606.23	−0.52	24
19			(20,25]	132	1 476.00	−0.08	19
20			(25,30]	131	1 180.76	0.14	17
21			(30,84]	509	1 725.03	1.12	3
22	河流侵蚀	干流影响距离/m	[0,200]	60	359.65	0.55	9
23			(200,400]	52	347.49	0.44	11
24			(400,600]	61	338.64	0.62	8
25			(600,800]	65	333.59	0.70	6
26			(800,1000]	38	327.29	0.18	16
27	植被覆盖	*NDVI*	[−0.392 405,0.064 464]	85	775.96	0.13	18
28			(0.064 464,0.189 456]	362	1 519.45	0.90	5
29			(0.189 456,0.297 209]	302	2 147.17	0.38	13
30			(0.297 209,0.396 341]	148	3 044.75	−0.69	26
31			(0.396 341,0.499 783]	53	3 033.87	−1.71	30
32			(0.499 783,0.706 667]	23	2 534.47	−2.37	32

① $I/Nat = \ln[(N_j/S_j)/(N/S)]$

从易发程度影响因素信息量计算结果看，影响地质灾害易发性的主要因子中排在前 5 位的分别是：工程岩组的老黄土（Q1 − Q2）、老滑坡堆积体、坡度大于 34°的边坡、处于活动断裂 300 m 内的区域以及植被发育极低的区域。根据各要素的信息量值及其排序设置各要素的权重，将所有单要素图层分别进行重分类和赋值，再对要素图层相加运算，即得到易发性的计算评估结果（图 12）。从评价结果看，高易发区分布在黄土丘陵的分水岭及塬边、秦岭山前与渭河、千河、嘉陵江等大型河谷沿岸；中易发区分布北山黄土梁、西部陇山及南部秦岭的二级支沟内。

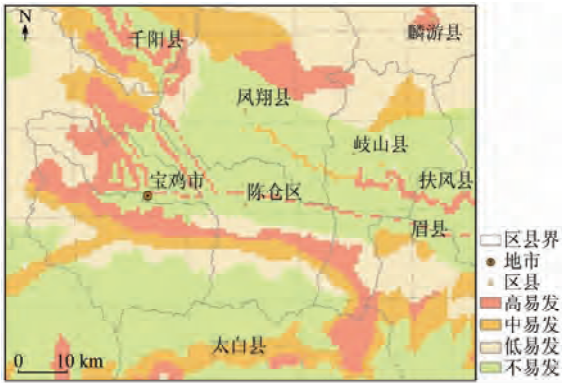


图 12　宝鸡黄土区地质灾害易发性评价结果图

Fig. 12　Geological hazards susceptibility assessment results map in Baoji loess area

4.3　危险性评价

在易发性评价的基础上,重点考虑区域降雨量的变化和人类工程活动强度诱发地质灾害的可能性,以及地质灾害最大位移距离进行地质灾害危险性评价。

近年来宝鸡地区局部极端降雨量变化异常,因此,选择近 3 a(2010—2012 年)区域降雨均值的空间分布,作为未来若干年可能发生的降雨趋势。人类工程活动主要考虑路网特别是干线公路的影响,以一定间距建立缓冲区计算信息量(表 3)。

表 3　地质灾害危险性影响因素信息量计算结果

Tab. 3　Calculation results of influence factor information quantity for risk of geological hazards

序号	一般分类	具体要素	要素区间	计算参数		信息量	
				灾点 N_j/处	S_j/km^2	I/Nat	排序
1	区域降雨	多年平均降雨量/mm	(0,75]	1	55.38	-1.677	12
2			(75,100]	33	346.08	-0.013	10
3			(100,125]	93	952.06	0.011	8
4			(125,150]	364	3 742.61	0.007	9
5			(150,175]	275	2 668.74	0.064	7
6			(175,200]	148	1 389.97	0.097	6
7			(200,225]	58	694.13	-0.145	11
8			(225,max]	1	221.70	-3.064	13
9	主干公路	公路缓冲距离/m	[0,20)	31	89.76	1.274	2
10			[20,40)	23	88.34	0.991	4
11			[40,60)	34	86.90	1.399	1
12			[60,80)	24	85.85	1.062	3
13			[80,100)	18	85.06	0.784	5

计算结果来看,单元总信息量总体上反映各因素对灾害发生的贡献率大小。根据各要素的信息量值及其排序设置各要素的权重,将所有单要素图层分别进行重分类和赋值,再对要素图层相加运算,即得到危险性的计算评估结果(图 13)。从危险性评价结果看: 宝鸡黄土区地质灾害高危险区主要分布于在渭河北岸的黄土塬边斜坡,包括渭河北岸引渭渠沿线,金陵河东岸,长寿沟、千河两岸,渭河南岸的秦岭山前黄土梁峁与黄土台塬的过渡地带,渭河南岸神农镇、高家镇、坪头镇段以及宝成铁路沿线的清姜河两岸的中低山区,凤县与太白县主干公路边两侧; 中危险区分布于黄土丘陵梁峁区及区域二级侵蚀冲沟内。

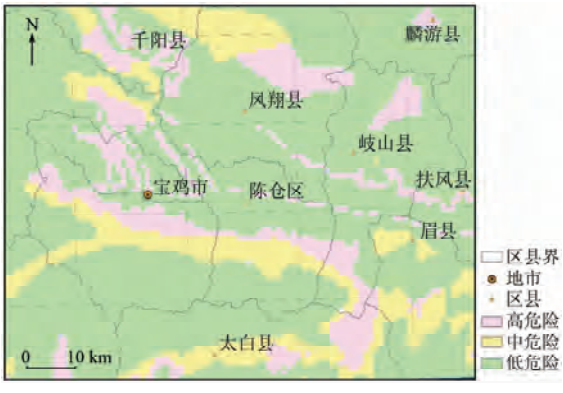


图 13　宝鸡黄土区地质灾害危险性评价结果图

Fig. 13　Geological hazards risk assessment results map in Baoji loess area

5　结论

1) 国产 ZY-3 高分辨率卫星数据能够满足的地质灾害遥感调查工作,解译标志明显,精度高,工作比例尺可达 1∶25 000。在此比例尺下 ZY-3 数据的灾害体遥感解译总体精度为 74.6%。可有效保证黄土区大、中型地质灾害体的遥感识别,且可以替代同分辨率国外数据作为今后 1∶50 000 比例尺与1∶25 000比例尺地质灾害详查主要数据源。

2) 国产 ZY-3 高分辨率卫星数据能够有效提取地质灾害的孕灾环境因子,其地质灾害易发性及危险性评价结果与本地区已有地质灾害点分布情况基本一致,表明 ZY-3 卫星数据能够为 1∶25 000 比例尺和 1∶50 000 比例尺地质灾害详细调查评价提

供丰富的孕灾环境信息。

参考文献(References):

[1] 张茂省,雷学武,校培喜,等. 遥感技术在黄土高原区地质灾害详细调查中的应用[J]. 西北地质,2007,40(3):92 - 97.
Zhang M S,Lei X W,Xiao P X,et al. Application of remote sensing in detailed survey of geological hazards in Loess Plateau [J]. Northwestern Geology,2007,40(3):92 - 97.

[2] 朱兴华,彭建兵,同 霄,等. 黄土地区地质灾害链研究初探[J]. 工程地质学报,2017,25(1):117 - 122.
Zhu X H,Peng J B,Tong X,et al. Preliminary research on geological disaster chains in Loess Area[J]. Journal of Engineering Geology,2017,25(1):117 - 122.

[3] 许 领,戴福初,闵 弘. 黄土滑坡研究现状与设想[J]. 地球科学进展,2008,23(3):236 - 242.
Xu L,Dai F C,Min H. Research progress and some thoughts on loess landslides[J]. Advances in Earth Science,2008,23(3):236 - 242.

[4] 徐张建,林在贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(7):1297 - 1312.
Xu Z J,Lin Z G,Zhang M S. Loess in China and loess landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(7):1297 - 1312.

[5] 张茂省,校培喜,魏兴丽,等. 延安宝塔区滑坡崩塌地质灾害[M]. 北京:地质出版社,2008:1 - 11.
Zhang M S,Xiao P X,Wei X L,et al. Yan'an Baota Landslide Collapse of Geological Disasters[M]. Beijing:Geological Publishing House,2008:1 - 11.

[6] 陕西省滑坡工作办公室. 陕西省滑坡分布说明图(1:750 000)[M]. 西安:西安地图出版社,1995.
Landslide Office of Shaanxi Province. Landslide Distribution Map Manuals of Shaanxi Province(1:750 000)[M]. Xi'an:Xi'an Cartographic Publishing House,1995.

[7] 陕西省滑坡工作办公室. 陕西省滑坡分布图,陕西省滑坡灾害预测图(1:750 000)[M]. 西安:西安地图出版社,1995.
Landslide Office of Shaanxi Province. Landslide Distribution Map of Shaanxi Province,Landslide Hazard Prediction Map of Shaanxi Province(1:750 000)[M]. Xi'an:Xi'an Cartographic Publishing House,1995.

[8] 王念秦,张倬元. 黄土滑坡灾害研究[M]. 兰州:兰州大学出版社,2005.
Wang N Q,Zhang Z Y. Study on Loess Landslide Disasters[M]. Lanzhou:Lanzhou University Press,2005.

[9] 石 玲,王 涛,辛 鹏. 陕西省宝鸡市地质灾害发育特征[J]. 地质力学学报,2013,19(4):351 - 363.
Shi L,Wang T,Xin P. Development characteristics of the geo - Harzards in Baoji City,Shaanxi Province[J]. Journal of Geomechanics,2013,19(4):351 - 363.

[10] 韩海辉,王艺霖,李健强,等. 资源三号卫星在地质灾害调查中的应用对比——以宝鸡黄土区为例[J]. 遥感信息,2016,31(2):69 - 74.
Han H H,Wang Y L,Li J Q,et al. Application contrast of ZY - 3 satellite in geological hazard survey:A case study of Baoji loess areas[J]. Remote Sensing Information,2016,31(2):69 - 74.

[11] 李 明,杜继稳,高维英. 陕北黄土高原区地质灾害与降水关系[J]. 干旱区研究,2009,26(4):599 - 606.
Li M,Du J W,Gao W Y. Study on the relationship between geological disasters and precipitation in the loess plateau in north Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research,2009,26(4):599 - 606.

[12] 李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星 - 资源三号测绘卫星[J]. 测绘学报,2012,41(3):317 - 322.
Li D R. China's first civilian three - line - array stereo mapping satellite:ZY - 3[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2012,41(3):317 - 322.

[13] 王朝阳. 坡向与斜坡稳定性的关系研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2008.
Wang Z Y. Study on the relationship between aspect and slope stability[D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology,2008.

The application of ZY - 3 satellite to geological hazards survey and evaluation: A case study of Baoji loess area

LI Jianqiang, HAN Haihui, GAO Ting, YANG Min, LIANG Nan

(*Xi'an Center of China Geological Survey*, *Xi'an* 710054, *China*)

Abstract: The development of domestic satellites, especially high resolution satellites, has injected new vitality into the application of satellite remote sensing to geological survey, and has shown good application results. By using the image data of 2013 and 2014 obtained from the ZY - 3 satellite (ZY - 3), the authors extracted hazard formative factors such as topography, active faults, water systems, vegetation and artificial engineering from, with the purpose of carrying out geological hazards survey in Baoji loess area. Combined with the data of engineering geological petrofabric and rainfall in Baoji area, the authors carried out susceptibility and risk assessment of the geological hazards by using the information model. The results provide a demonstration for geological hazards survey, monitoring and evaluation in the loess landslide area by using domestic high resolution satellites.

Keywords: ZY - 3 satellite(ZY - 3); geological hazards; survey and evaluation; Baoji

(责任编辑:邢 宇,张 仙)