

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.01.25

盐池县地质灾害遥感调查及空间分布特征

张晓东^{1,2}, 刘湘南¹, 赵志鹏², 赵银鑫², 马玉学², 刘海燕²

(1. 中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083;

2. 宁夏回族自治区地质调查院, 宁夏 银川 750021)

摘要:宁夏盐池县地处黄土高原区, 地质灾害较为频繁。以 SPOT6、RapidEye、无人机以及 LandSat8 OLI 等多源遥感数据为基础, 通过研究遥感影像特征, 建立地质灾害解译标志, 共解译出滑坡 125 处、崩塌 84 处、泥石流 19 处、地面塌陷区 3 处。结合区域地理地质环境特征, 总结了研究区地质灾害点的基本特征, 并利用 GIS 技术对灾害点进行点密度分析, 在此基础上划分了 7 个集中分布区, 归纳了盐池县地质灾害点的空间分布特征及规律; 同时, 对研究区地层构造、植被、地形等因素与地质灾害点空间分布特征的相关性进行了讨论。研究结果表明: 盐池县地质灾害点具有规模小, 灾害轻; 点密度整体南高北低, 且南部聚集、北部分散; 地层、植被、坡度、坡向等因素与地质灾害有着密切的联系。

关键词: 地质灾害; 遥感解译; 空间分布特征; GIS; 盐池县

中图分类号: TP753; P694

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)01-0164-07

Survey of geological hazards by RS and the spatial distribution characteristics in Yanchi county

ZHANG Xiaodong^{1,2}, LIU Xiangnan¹, ZHAO Zhipeng², ZHAO Yinxin², MA Yuxue², LIU Haiyan²

(1. School of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Ningxia Geological Survey Institute, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Yanchi county in the Ningxia Autonomous Region lies in the Loess Plateau, where ecological environment is weak and severe geological hazards frequently occur. Based on the RS data such as SPOT6, RapidEye, LandSat8 OLI and UAV, 125 landslides, 84 collapses, 19 debris-flows and 3 surface collapses are interpreted by examining the RS image characteristics and by building interpretation indication of geological hazards. According to regional geographical and geological environmental characteristics, the basic features of the geological hazard points are summarized. Seven concentrated distribution regions are divided and the spatial distribution characteristics of geological hazard points are characterized on the basis of the point density analysis by employing the GIS technology. This paper uses the spatial analysis function of GIS to discuss the relationship between the geological hazard spatial distribution and vegetation and topography. The results show that geological hazard points in the study area are characterized by small size, low hazard and such threat objects as village, farmland and country roads. Point density is high in the south and low in the north, suggesting that the hazard points are concentrated in the south and dispersed in the north, and the concentrated region is located in Mahuangshan-Xuejiapan. The strata, vegetation, slope and aspect are related to geological hazards.

Keywords: geological hazard; RS interpretation; spatial distribution characteristics; GIS; Yanchi county

收稿日期: 2016-04-05; 修订日期: 2016-06-06

基金项目: 宁夏回族自治区国土资源厅“宁夏盐池县地质灾害详细调查项目”(XC(2012)-05)

第一作者: 张晓东(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事遥感地质灾害研究工作。E-mail: 33131692@qq.com

通讯作者: 刘湘南(1964-), 男, 教授, 博导, 主要从事资源环境遥感信息机理及应用模型研究。E-mail: liuxn@cugb.edu.cn

宁夏地质条件复杂,自然环境恶劣,具有地质灾害种类多、危害大、分布广的特点,属地质灾害多发区,特别是在生态环境极为脆弱的黄土覆盖区,滑坡、崩塌、泥石流等灾害隐患分布广泛^[1]。宁夏盐池县地质环境极为脆弱,是全区地质灾害较为发育的地区之一。据宁夏盐池县国土局统计,2011年盐池县重点防范的地质灾害隐患点达21处,威胁人口约1034人,农田约1万亩,严重影响当地经济发展和人民生命财产安全。因此,开展宁夏盐池县地质灾害详细调查对防灾减灾和促进当地经济发展具有重要的现实意义。

遥感是获取地表及地物信息的一种重要手段,其实时、快速、准确以及经济的特点,在地质灾害调查中发挥着越来越大的作用,尤其在大尺度地质灾害调查与监测中,遥感已成为最有效的方法和手段之一^[2-4]。本研究采用多源遥感数据,对宁夏盐池县滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷等地质灾害进行解译,了解研究区地质灾害的类型、特征、规模,利用GIS技术深入分析灾害体的空间分布特征及规律,并讨论地质灾害体与影响因子之间的相关性,对开展地质灾害野外调查具有重要的指导意义。

1 研究区和数据

1.1 研究区概况

盐池县位于宁夏回族自治区东部,总面积约8557.7 km²。气候属温带大陆性季风气候,冬长夏短,温差较大,干旱少雨,蒸发强烈,无常年地表水流,仅有一些小型的季节性积水洼地和季节性溪流,季节性变化非常明显。研究区地形复杂,总体呈南部高、北部低,中部高、东西两侧低的特点,北部沙漠丘陵区地势平缓起伏,南部黄土梁峁区沟壑纵横,地形破碎;地貌类型主要为低山丘陵、缓坡丘陵和黄土梁峁,地质环境条件十分脆弱,水土流失严重。地层区划属华北地层区,以车道—阿色浪断裂为界,西侧为鄂尔多斯西缘地层分区之桌子山—青龙山地层小区,东侧为鄂尔多斯地层分区之盐池—环县地层小区;境内出露最老地层为中元古界王全口组,奥陶系、三叠系、二叠系、侏罗系仅零星出露,白垩系主要分布在县城东部苏步井—红沟梁—佟记圈—青山一带,第四系地层分布广泛^[5-6]。盐池县大地构造位置属华北陆块之鄂尔多斯地块,以车道—阿色浪断裂为界,西部属鄂尔多斯西缘中元古代—早古生代裂陷带之陶乐—彭阳冲断带,东部属鄂尔多斯中生代拗陷之天环复向斜带。地震烈度为Ⅵ—Ⅷ度,地震动峰值加速度为0.05~0.20 g。

1.2 数据源及预处理

研究选用的遥感数据有SPOT6(2013/7/11)、RapidEye(2011/10/29)、高精度无人机数据(2013/3/12)、Landsat8 OLI(2013/6/7)以及ASTER DEM数据,影像质量较好。非遥感信息源主要包括地质环境背景资料、1:5万地形图、地质图、行政区划图及水系图等。SPOT6、RapidEye及无人机数据用于地质灾害解译,Landsat8 OLI用于植被指数信息提取。在ERDAS中利用1:5万地形图作为参考,采用二次多项式和最近邻法对影像进行配准,RMS误差均在0.5像元内,然后利用盐池县行政区划矢量数据提取研究区影像并对其进行增强,使影像更加便于解译。在ENVI5.0下,基于FLAASH大气校正模型对Landsat8完成校正,形成反射率图像。研究所用数据均采用中央经线105°E的高斯克吕格投影。在泥石流的解译过程中,以SPOT6和DEM数据为基础数据,在ArcScene中制作高精度三维遥感影像,不但全方位展示了灾害体与周围地质环境之间的关系,而且实现了对地质灾害体多视角、多尺度的动态观测,大大提高了解译精度^[7]。

2 地质灾害遥感解译

通过研究遥感影像上地质灾害体形态、阴影、纹理、色调等特征,并经过野外调查,建立遥感解译标志,采用目视解译和人机交互解译法,对研究区滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷4类地质灾害进行遥感解译,并归纳其发育特征。

2.1 滑坡

研究区滑坡多为黄土滑坡,主要分布于盐池县南部黄土丘陵区的沟谷、河流两侧,多为中小型。滑体坡度一般为30°~45°,形态较完整,边界轮廓清晰,后缘滑壁保留一般较完好,滑体滑移特征明显。滑坡遥感解译标志如下:(1)多分布在沟谷陡峭边坡地段或河流拐弯部位,有时密集、成群出现;(2)平面形态在影像上表现为舌形、半圆形、圆弧形、扇形等形态;(3)与周围地物具有不同的色调和纹理,多为墨绿色;(4)滑坡体后缘发育有弧形或长弧形特征影像,如陡坎、地形变化线等,色调异常,立体效果明显;前缘边坡向谷地凸出,常有地形微突起及小型崩滑堆积影像,滑坡壁上植被稀少^[8-9]。

贺家渠滑坡位于贺家渠南约1 km处,自西向东沿沟谷南岸分布3个滑坡,发育在第四系上更新统马兰组(Q_p³m)地层中,属典型黄土滑坡,滑坡群整体呈NW方向展布,其中滑坡b规模最大(图1)。据遥

感解译和野外调查:滑坡 a 长轴呈 NW 向展布,长约 160 m,最宽处约 78 m,后缘呈向南凸出的弧形,前缘宽约 146 m;滑坡 b 长轴呈 NW 向展布,长约 220 m,最宽处约 70 m,后缘呈向南凸出的弧形,前缘宽约 169 m,坡度约 47° ,滑体厚度约 7 m;滑坡 c 长轴呈 NNW 向展布,长约 148 m,最宽处约 73 m,后缘呈向南西凸出的弧形,前缘宽约 158 m。滑坡群在影像上为圆弧状,颜色呈墨绿色,与周边黄土沟壑、农田的颜色迥然不同,界线清晰。滑坡后壁高陡,外形上呈圈椅状,发育少量落水洞及裂缝,表面略显凹凸不平,植被不发育,滑体土质疏松,相对高差约为 60 m。贺家渠滑坡现状虽基本稳定,但危险性较大。



图 1 贺家渠滑坡影像和照片

(左图为 SPOT6 影像,右图为滑坡 b 照片,镜向: 195°)

Fig. 1 Image and photo of the Hejiaqu landslide

(SPOT6 image on the left and photo of landslide b on the right)

2.2 崩塌

研究区崩塌相对较少,且多为黄土崩塌,主要分布在盐池县南部黄土覆盖地区,以小型崩塌为主。崩塌遥感解译标志如下:(1)主要分布于沟谷两侧、沟陡坡及公路沿线地带;(2)平面形态在影像上表现为弧形、舌形或扇形等;(3)崩塌壁一般为陡壁,与周围色调差异较大,有粗糙感,色调多呈灰色,堆积体特征显著,基本无植被覆盖^[10]。

干井沟崩塌为研究区较为典型的黄土崩塌,位于李塬畔村北侧约 3 km 处,发育于第四系上更新统马兰组(Q_p^3)地层中,沟底见白垩系环河组(K_1hh)紫红色薄层的砂质泥岩(图 2)。据遥感解译和野外调查:该崩塌体高约 100 m,前缘长约 130 m,厚约 15 m,崩塌后缘近直立,表层土体裸露,无植被生长。后缘坡壁上可见分级台阶,且有垂直裂隙发育。崩塌体呈块状,散落堆积与沟底及沟侧,其上稍有植被生长,覆盖率小于 5%。在影像上呈弧形,颜色为深紫色,且影像粗糙(图 3)。该崩塌现状稳定性较好,危险性较小。

2.3 泥石流

研究区泥石流发育较少,共解译泥石流 19 条,主

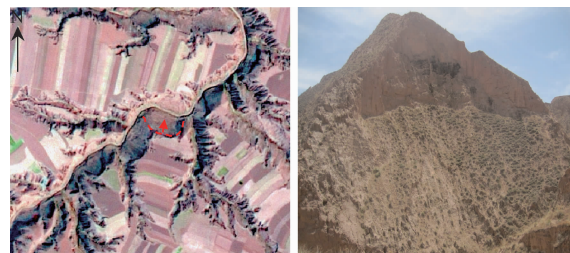


图 2 干井沟崩塌影像和照片

(左图为 SPOT6 影像,右图为照片,镜向: 165°)

Fig. 2 Image and photo of the Ganjingou collapse

(SPOT6 image on the left and photo on the right)

要分布在盐池县王乐井乡及麻黄山乡东北部,均属于小型沟谷型稀性泥石流。泥石流遥感解译标志如下:(1)一般形成区于沟谷的中上部,多呈勺状、漏斗状或椭圆状且三面环山,山坡较陡,支沟呈树枝状,汇水面积较大,植被稀少,沟两侧有小型崩塌发育,细沟和坡面侵蚀严重并发育大量松散碎屑;(2)流通区多为深切沟谷,沿沟两侧及沟底有明显的刨蚀和冲刷作用痕迹,断面呈“V”形;(3)堆积区常位于沟谷出口处,纵坡平缓,地形较开阔平直,常形成堆积扇地貌,直接危害沟下游村庄、农田和道路^[11~13]。研究区典型的泥石流有王乐井乡西沟泥石流、王乐井乡东沟泥石流以及史记洼沟泥石流(图 3)。

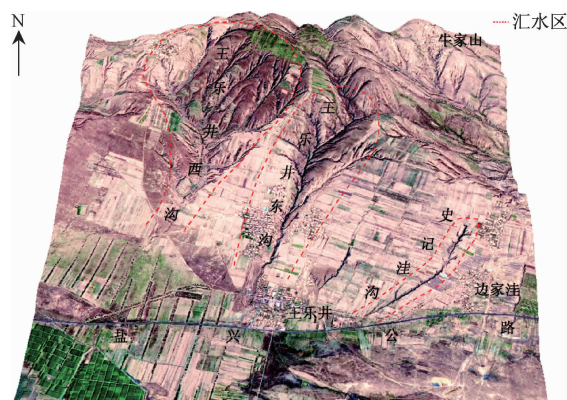


图 3 王乐井乡泥石流 3D 遥感影像

Fig. 3 3D image of debris-flow hazards in

Wanglejing county

王乐井西沟泥石流呈近 SN 向发育,主沟长约 3.4 km,宽约 50 m,深约 8 m,流域面积约 3.5 km^2 ;王乐井东沟泥石流呈 NE—SW 发育,主沟长约 2.9 km,宽约 20 m,深约 10 m,流域面积约 1.4 km^2 。王乐井西沟及东沟泥石流沟谷上游汇水面积较大,两侧支沟有树枝状水系发育,地形较陡,坡度较大,切割强烈,总体呈“V”型,植被覆盖率低;中下游较开阔,切割较浅,沟床

起伏较小,呈宽缓“U”型,沟岸两侧山坡基岩裸露,风化强烈。史记洼沟泥石流呈 NE—SW 发育,上游最高海拔 1596 m,下游最低标高约 1551 m。主沟长约 1.5 km,宽约 15 m,深约 5 m,沟谷宽度较均匀,陡坎、卡口不多,沟谷两侧地势较平缓,多被开垦为农田种植玉米等农作物,山体坡度多小于 10° ,呈“U”型沟谷,流域面积约 0.25 km^2 。补给区沟道长约 500 m,支沟长度多小于 80 m,主支沟交角多数小于 60° ,流通区长约 1000 m,支沟不发育。

以上 3 条泥石流沟具备形成泥石流的地形条件,松散物丰富,主要来源于沟道堆积物、岸坡残坡积物,在暴雨或持续降雨作用下存在发生泥石流灾害的可能性,故会对下游的王乐井乡、盐兴公路及农田造成危害(图 3)。

2.4 地面塌陷

利用高精度无人机遥感数据(分辨率为 0.2 m),对金凤煤矿的地面塌陷进行解译,共解译地面塌陷区 3 处,表现为地裂缝,共计 16 条,均为煤炭资源开采引起(图 4)。T1 位于矿区东北部,冯大路穿越该区,地表变形区长约 500 m,东西宽约 300 m,面积约 0.15 km^2 ,发育地裂缝 4 条;T2 位于矿区中部,S304 线穿越

该区,地表变形区南北长约 650 m,东西宽约 500 m,面积约 0.33 km^2 ,发育地裂缝 6 条;T3 位于矿区南部,地表变形区南部长约 530 m,东西宽约 300 m,面积约 0.16 km^2 ,发育地裂缝 6 条。现以 L10 为例说明地裂缝影像特征。L10 位于金凤煤矿东北约 1 km 处,在影像上呈灰色或黑色,形态上表现为细条状,植被覆盖低,周围填埋痕迹明显,在影像上表现为规则的线性纹理。经野外调查,L10 长约 430 m,宽 30~50 cm,深 10~100 cm,具张裂性质,地表有较明显的沉陷。金凤煤矿地面塌陷区分布有 S304 线、冯大路,野外调查发现塌陷对上述交通设施造成破坏,危险性较大。

3 结果分析

3.1 地质灾害基本特征

盐池县地质灾害的遥感解译及统计分析结果表明,研究区地质灾害点具有如下基本特征:(1)研究区灾害类型主要有滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷 4 种,共解译地质灾害点 231 处,其中滑坡 125 处、崩塌 84 处、泥石流 19 处、地面塌陷 3 处,以滑坡为主,其次为崩塌,泥石流及地面塌陷发育较少。(2)研究区灾害点规模小,灾害轻,威胁对象多为村庄、农田及乡村道路。统计结果表明,在解译的地质灾害点中,中型滑坡有 17 个,大型崩塌 4 个,中型崩塌 21 个,其余地质灾害点规模均为小型。从危害程度看,除惠安堡镇麦草掌村滑坡、贺家渠村贺家渠社滑坡、王乐井乡西沟泥石流、王乐井乡东沟泥石流、史记洼沟泥石流以及金凤煤矿地面塌陷对人员、公路及过往车辆危害性较大外,其余灾害点威胁对象为周边农田及乡村道路。

3.2 地质灾害空间分布特征

空间分布特征不仅能够直观体现灾害点的空间分布规律,而且能揭示灾害点与不同地质环境要素之间的相关性。对研究区 8 个乡镇的地质灾害点进行统计,结果表明地质灾害点主要分布在麻黄山乡、大水坑镇及惠安堡镇,其中麻黄山乡 171 个,大水坑镇 36 个,惠安堡镇 12 个,王乐井乡 6 个,冯记沟乡 3 个,花马池镇 2 个,青山乡 1 个。研究区地质灾害点空间分布有两大特征:(1)多沿沟谷线方向呈线性排列分布,如在麻黄山地区,灾害点主要沿苦水河沟、李家大湾沟、彭家沟、史家疙瘩沟、张南沟、曾家渠北沟等 6 条北西向沟谷分布;(2)灾害点空间分布具有区域聚集特征(图 5)。盐池县地质灾害点密度整体呈南高北低的特点,且南部聚集,北部分散。具体来看,在麻黄山乡一麻家

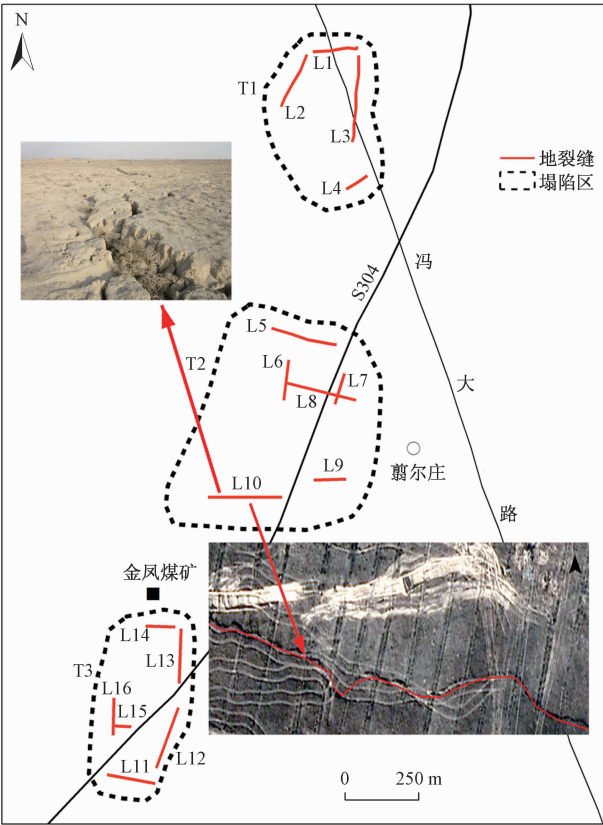


图 4 金凤煤矿地面塌陷遥感解译图
Fig. 4 RS interpretation graph of surface collapse in Jinfeng coal mine

畔、施记新庄—王家下湾、金盆湾—井沟、王乐井乡周边地区点密度较高,表明灾害点分布集中,聚集度较强,而在刘忠窑、曹家湾子、三道湾、土沟等地灾害点分布相对分散,聚集度较低;滑坡和崩塌点主要集中在麻

黄山乡—麻家畔及王家下湾一带(图 5b、c);泥石流点分布格局较为分散,在王乐井乡、三道湾、土沟、金盆湾、薛家畔点密度相对较高,其余地区较低(图 5d),地面塌陷集中在冯记沟乡的金凤煤矿。

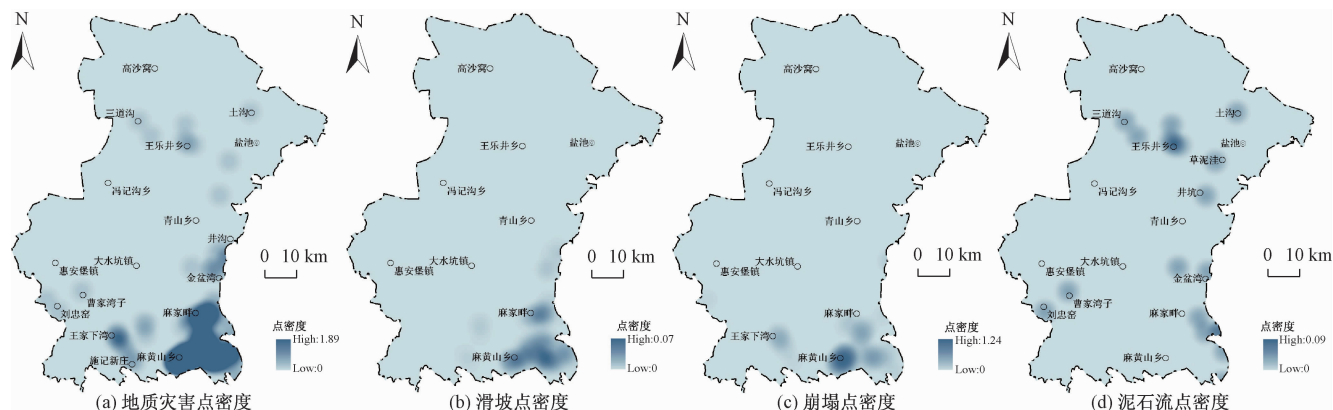


图 5 研究区地质灾害点空间密度分布图

Fig. 5 Spatial density distribution of geological hazards points in study area

根据研究区地质灾害点密度分布特征,结合地形、地貌以及地质环境特征,将盐池县地质灾害点空间分布进一步划分为:三道沟—王乐井乡—草泥洼—土沟分布区、金盆湾—甜水沟分布区、金凤煤矿分布区等 7 个区域(图 6),各分布区特征见表 1。

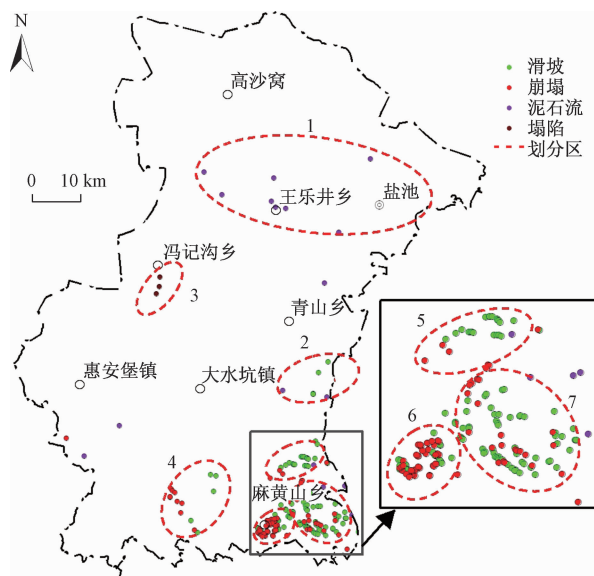


图 6 研究区地质灾害点空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution pattern of geological hazards points in study area

由以上分布区可以看出,研究区地质灾害点主要集中分布在麻黄山地区,该地区地质环境条件差,人类工程活动较频繁,因村民切坡建房、打窑,破坏了灾害体的稳定性,存在发生灾害的可能性,直接威胁村民的

人身安全,必须对该地区进行地质灾害重点防治。

3.3 地质灾害与地层构造的相关性

野外调查统计和遥感解译分析的结果表明,研究区灾害点主要分布在第四系的地层中,其中 135 个地质灾害点发生在第四系马兰组(Q_p^3m),55 个为萨拉乌苏组(Q_p^3s)。这是由于黄土结构疏松,强度低,节理裂隙发育,且遇水容易软化、湿陷,使其抗拉、抗剪强度降低,导致地质灾害易发生。断层是评价地质区域稳定性的重要因素之一,是地质灾害调查工作的重要研究对象。车道—阿色浪断裂是研究区最大的断裂,其沿内蒙古桌子山东麓的阿色浪—盐池—甘肃阿色浪—彭阳一线呈南北向延伸,在盐池县境内长约 130 km。将研究区的地质灾害点与该断裂的分布进行空间叠加分析表明,境内该断层与灾害点在空间关系上无明显相关性,绝大部分灾害点不受断层控制,其展布与断层分布并不吻合。

3.4 地质灾害与植被、地形的相关性

植被是地表的重要组成部分,对地表环境的依赖性大,是自然环境变化和人类活动影响最直接的生态体现。本研究基于 Landsat8 OLI 数据反演获取研究区归一化植被指数(NDVI),并将 NDVI 分为 6 个等级: $[-1, 0]$ 为无植被覆盖区; $(0, 0.1]$ 为植被覆盖稀少区; $(0.1, 0.3]$ 为植被覆盖较少区; $(0.3, 0.5]$ 为植被覆盖一般区; $(0.5, 0.7]$ 为植被覆盖较好区; $(0.7, 1]$ 为植被覆盖良好区。结果表明,灾害点的分布与植被覆盖状况密切相关,灾害点更易于发生在植被发育较

表 1 研究区地质灾害点椭圆分布区特征表

Table 1 Characteristics of elliptical distribution region of geological hazards points in study area

编号	分布区域	展布方向	长轴/km	短轴/km	分布区内灾害点数量及类型
1	盐池县北部王乐井乡周边	NWW	50	50	8 个,均为泥石流
2	盐池县中部青山乡以南	近 EW	19	9	11 个,其中滑坡 7 个,崩塌、泥石流各 2 个
3	冯记沟乡以南	NE	10	6	3 个,均为地面塌陷
4	麻黄山乡以西	NE	18	8	14 个,其中滑坡 5 个,崩塌 9 个
5	麻黄山乡以北麻家畔地区	NNE	11	6	25 个,其中滑坡 21 个,崩塌 3 个,泥石流 1 个
6	麻黄山乡周边	NE	7	5	66 个,其中滑坡 24 个,崩塌 42 个
7	麻黄山乡以东	NW	14	11	83 个,其中滑坡 62 个,崩塌 21 个

差的地区,研究区有 172 个地质灾害点都分布在无植被覆盖区、植被覆盖稀少区以及植被覆盖较少区,约占总数的 74% (图 7a)。

坡度影响着土壤流失与成土的速率,是控制水土流失的主要因素之一,坡向的不同则导致山坡的土体含水量、风化程度等存在显著差异。因此,坡度坡向将直接影响到地质灾害的类型及发育程度。对研究区的地质灾害点及其所处地形进行叠加分析(图 7b、c),并

统计不同坡度、坡向的地质灾害数量,研究地质灾害体在哪一坡度、坡向范围内最易发生,统计结果表明,坡度越大,发生地质灾害的可能性越强,研究区 65% 的地质灾害点分布在 10°~30°之间的坡地,10°以下约占 17%,而在 35°~45°之间的约为 11%。从坡向上看,滑坡、崩塌发生在 NE、SW 方向上的相对较多,约占了总数的 45%,而在 N、W、NW 方向数量相对较少,占比仅为 15%。

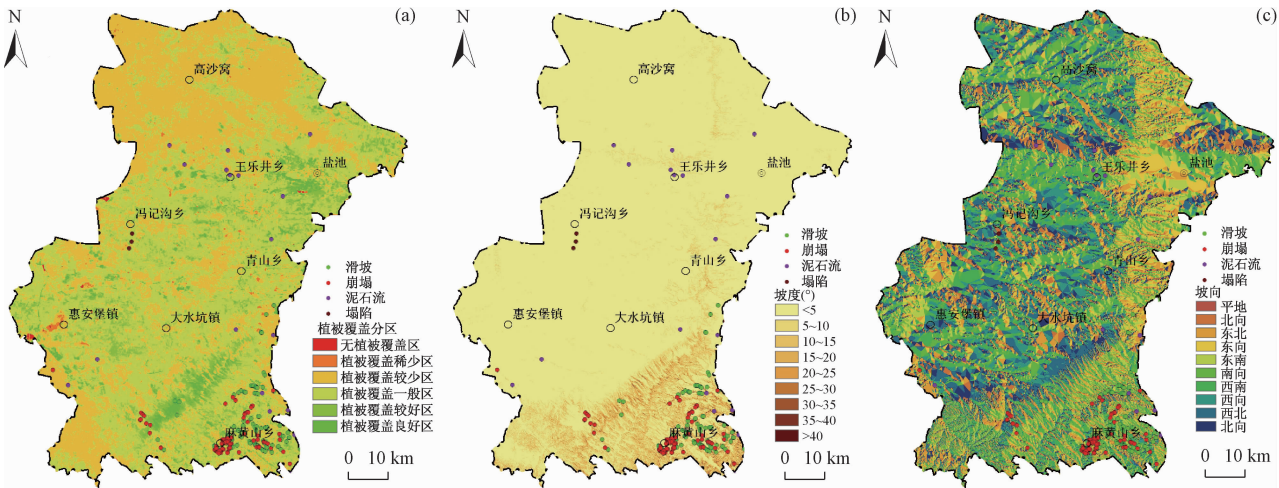


图 7 研究区地质灾害分布与植被 (a)、坡度 (b)、坡向 (c) 的关系

Fig. 7 Relationship between geological hazards distribution and vegetation (a), slope (b) and aspect (c) in study area

4 结论

(1) 利用 SPOT6、RapidEye、无人机及 LandSat8 OLI 等多源、多时相遥感数据,结合野外调查,建立地质灾害解译标志,快速、准确解译出盐池县地质灾害点共计 231 处,其中滑坡 125 处、崩塌 84 处、泥石流 23 处、地面塌陷 3 处,且灾害点具有规模小、灾害轻,威胁对象多为村庄、农田及乡村道路的特点。

(2) 研究区地质灾害点主要分布在麻黄山乡、大水坑镇和惠安堡镇,表现出沿苦水河沟、李家大湾沟、彭家沟、史家疙瘩沟、张南沟、曾家渠北沟等 6 条北西

向沟谷呈线性分布的特征。

(3) 灾害点空间分布表现出区域聚集特征。点密度图结果显示研究区灾害点密度整体呈南高北低的特点,且南部聚集,北部分散;在麻黄山乡-麻家畔-施记新庄—王家下湾、金盆湾—井沟、王乐井乡周边地区点密度较高,表明灾害点分布集中,聚集度较高;而在刘忠窑、曹家湾子、三道湾、土沟等地点密度较低,灾害点分布分散,聚集度较低。

(4) 对遥感解译地质灾害点和地层构造、植被、坡度、坡向等因子进行叠加分析,结果表明地层、植被、坡度、坡向是影响盐池县地质灾害发生的重要因素,而断层与其在空间关系上无明显相关性。

参考文献:

- [1] 陈豫英,赵光平,王红英,等.宁夏地质灾害气象预报预警研究[J].自然灾害学报,2008,17(3):81-86. [CHEN Y Y, ZHAO G P, WANG H Y, *et al.* Study on meteorological forecast and early warning of geological disasters in Ningxia[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(3):81-86. (in Chinese)]
- [2] 陶明刚. Landsat-TM 遥感影像岸线变迁解译研究——以九龙江河口地区为例[J].水文地质工程地质,2006,33(1):107-110. [TAO M G. Interpretation of coastline changes based on Landsat TM remote sensing images: an example of the mouth area of Jiulongjiang river [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(1):107-110. (in Chinese)]
- [3] 薛东剑,张东辉,何政伟.多源遥感影像融合技术在地质灾害调查中的应用[J].遥感技术与应用,2011,26(5):664-669. [XUE D J, ZHANG D H, HE Z W, *et al.* Application of multi-source remote sensing image fusion in geohazard investigation[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011,26(5):664-669. (in Chinese)]
- [4] 方成,孙晓明,康慧,等.遥感技术在曹妃甸海岸带地质环境调查中的应用[J].水文地质工程地质,2015,42(3):119-127. [FANG C, SUN X M, KANG H, *et al.* Application of remote sensing technology to geological environment investigation in the Caofeidain coastal zone [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3):119-127. (in Chinese)]
- [5] 吴学华,王红艳.宁夏回族自治区盐池县地质灾害调查与区划报告[R].银川:宁夏回族自治区地质环境监测总站,2009:4-30. [WU X H, WANG H Y. Report of geological disasters investigation and zonation in Yanchi county, Ningxia Hui Autonomous Region[R]. Yinchuan: Survey and Monitor Institute of Land and Resources of Ningxia, 2009:4-30. (in Chinese)]
- [6] 王成,孟方,李天斌,等.宁夏回族自治区区域地质志[R].银川:宁夏回族自治区地质调查院,2013:23-30. [WANG C, MENG F, LI T B, *et al.* Regional geology of the Ningxia Hui Autonomous Region[R]. Yinchuan: Geology Survey Institute of Ningxia, 2013:23-30. (in Chinese)]
- [7] 乌云其其格,马维峰,张时忠,等.基于三维的地质灾害遥感解译标志管理系统设计与实现[J].国土资源遥感,2012,93(2):148-151. [WU Y Q Q G, MA W F, ZHANG S Z, *et al.* The design and development of the interpreting marks management system for geological disasters based on 3D [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2012,93(2):148-151. (in Chinese)]
- [8] 张东明,李剑锋,田贵维,等.基于GIS和RS的重庆市滑坡遥感解译[J].自然灾害学报,2011,20(2):56-61. [ZHANG D M, LI J F, TIAN G W, *et al.* Remote sensing interpretation of landslide in Chongqing based on GIS and RS technologies [J]. Journal of Natural Disasters, 2011,20(2):56-61. (in Chinese)]
- [9] 王治华.滑坡遥感[M].北京:科学出版社,2012. [WANG Z H. Remote sensing for landslide [M]. Beijing: Science Press,2012. (in Chinese)]
- [10] 徐刚,郑达兴,李述靖,等.黄土高原西南部陇县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, Shanxi Province, China [J]. Geological Bulletin of China,2008,27(11):1837-1845. (in Chinese)]
- [11] 乔彦肖,赵志忠.冲洪积扇与泥石流扇的遥感影像特征辨析[J].地理学与国土研究,2001,17(3):35-38. [QIAO Y X, ZHAO Z Z. Discrimination between the features of remote sensing images of alluvial-diluvial fan and debris flow fan [J]. Geography and Territorial Research, 2001, 17(3):35-38. (in Chinese)]
- [12] 冯杭建,唐小明,游省易.泥石流调查遥感解译新方法研究[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(3):124-129. [FENG H J, TANG X M, YOU S Y, *et al.* New method on remote sensing interpretation for debris flow investigation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008,19(3):124-129. (in Chinese)]
- [13] 赵祥,李长春,苏娜.滑坡泥石流的多元遥感提取方法[J].自然灾害学报,2009,18(6):29-32. [ZHAO X, LI C C, SU N. Extraction of landslide/debris flow information based on multi-source remote sensing data[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(6):29-32. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华