第 28 卷第 2 期
2022 年 4 月

地 质 力 学 学 报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol. 28 No. 2
Apr. 2022

引用格式：姚闯闯，姚鑫，顾畛逵，等，2022. 基于 InSAR 识别的黄土高原活动性地质灾害发育规律分析［J］. 地质力学学报，28（2）：257-267. DOI：10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2021083

Citation：YAO C C，YAO X，GU Z K，et al.，2022. Analysis on the development law of active geological hazards in the Loess Plateau based on InSAR identification［J］. Journal of Geomechanics，28（2）：257-267. DOI：10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2021083

基于 InSAR 识别的黄土高原活动性地质灾害发育规律分析

姚闯闯[1,2]，姚　鑫[1,2]，顾畛逵[1,2]，任开瑀[1,2]，周振凯[1,3]
YAO Chuangchuang[1,2]，YAO Xin[1,2]，GU Zhenkui[1,2]，REN Kaiyu[1,2]，ZHOU Zhenkai[1,3]

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室，北京 100081；
3. 中国地质大学（北京）工程技术学院，北京 100083
1. *Institute of Geomechanics*，*Chinese Academy of Geological Sciences*，*Beijing* 100081，*China*；
2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety*，*Ministry of Natural Resources*，*Beijing* 100081，*China*；
3. *School of Engineering and Technology*，*China University of Geosciences*（*Beijing*），*Beijing* 100083，*China*

Analysis on the development law of active geological hazards in the Loess Plateau based on InSAR identification

Abstract：Active geological disasters induced by earthquakes，rainfalls and human engineering activities occur frequently in the Loess Plateau. However，there is a lack of systematic understanding of the development and distribution of active geological disasters in the Loess Plateau due to the wide area，active structure，diverse landforms and great difference in loess characteristics. InSAR technology can observe surface deformation in a wide range. Based on 40 sentinal-1 SAR data from January 1，2019 to March 31，2020，a total of 3286 active geological disasters in the Loess Plateau of 624，600 km^2 were interpreted by InSAR，including 1135 landslides，1691 mining collapses，368 subsidences and 92 landfills. Combined with geomorphological and optical image characteristics，four types of active geological hazards were interpreted，which reveals that they are mainly distributed in eight regions，including four landslide areas，three mining collapse areas and one subsidence area. The spatial distribution of active landslides is obviously regional and clustered，concentrating in the middle and west of China；while that of mining collapse and land subsidence densely developed in groups in the middle and west of China. There is a relationship between landslide development density and topography. The development of these geological disasters has an obvious spatio-temporal regularity. Regionally，the development intensity of geological disasters is controlled by topography and mineral resources；and in terms of scale，disasters identified by InSAR are all above medium size，which is different from traditional statistical methods. InSAR identification results objectively reflect the distribution of geological disasters in the Loess Plateau，and deepened our understanding on that as well. InSAR technique，meanwhile，can effectively detect the surface damage induced by underground coal mining，including its distribution，scope，strength，and monitor the depth and scope of opencast coal mine，and then infer the intensity of coal production activities.

Key words：active geological hazards；Loess Plateau；InSAR；landslide；coal mining collapse

---

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD20190717）；国家重点研发计划课题（2018YFC1505002）；三峡集团公司项目 YMJ（XLD）（19）110）

This research is financially supported by the Geological Survey Project of China Geological Survey（Grant No. DD20190717），the National Key Research and Development Project（Grant No. 2018YFC1505002），and the Project of Three Gorges Corporation（Grant No. YMJ（XLD）（19）110）

第一作者简介：姚闯闯（1996—），男，在读硕士，从事地质灾害与 InSAR 研究工作。E-mail：2393894121@ qq. com

通讯作者：姚鑫（1978—），男，博士，研究员，从事地质灾害与 InSAR 研究工作。E-mail：yaoxinphd@ 163. com

收稿日期：2021-07-16；**修回日期**：2021-12-15；**责任编辑**：吴芳

摘　要：地震、降雨、人类工程活动诱发的活动性地质灾害在黄土高原频现，但由于其地域广阔、构造活跃、地貌类型多样、各地黄土特性差异较大，一直以来缺乏活动性地质灾害发育分布的系统认识。InSAR 技术具有大范围观测地表变形的能力，文章利用 2019 年 1 月 1 日至 2020 年 3 月 31 日期间 40 期 Sentinal-1 SAR 数据，计算了整个黄土高原 62.46×10^4 km^2 的地表变形，辅助地貌和光学影像特征，解译了 4 类活动性地质灾害，共解译出活动性地质灾害 3286 处，其中滑坡 1135 处、采矿塌陷 1691 处、沉降 368 处、堆填变形体 92 处，同时对其活动发育规律进行了分析。黄土高原活动性地质灾害主要分布在八大区域，包括四大滑坡发育区、三大采矿塌陷分布区和一个沉降灾害分布区。活动性滑坡在空间分布上具有显著的区域性和丛集性，主要分布在中西部，滑坡体的发育密度与地形地貌有一定联系；采矿塌陷和地面沉降分布在中东部，密集且成群发育。地质灾害发育具有明显的时空发生规律，区域尺度上，地质灾害的发育密集程度受地形地貌和矿产资源的控制；灾害规模上，InSAR 识别的灾害规模都为中型以上，与传统统计手段有一定差别。InSAR 的识别结果客观反映了黄土高原地质灾害的分布规律。同时，InSAR 技术能够有效监测到地下采煤诱发的地表破坏的分布、范围和强度以及露天采煤矿坑深度和范围的扩展，进而推断煤业生产活动强度。

关键词：活动性地质灾害；黄土高原；InSAR；滑坡；采煤塌陷

中图分类号：P694；P237　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006-6616（2022）02-0257-11

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2021083

0　引言

黄土高原占中国国土面积的 6.5%，地貌类型多样，地势起伏差异巨大，根据自然资源部县市地质灾害调查与区划工作，黄土高原区土质滑坡占比为 72%，在滑坡规模上中型滑坡比例高（李媛等，2004）。据统计，中国有近 30%的滑坡发生在黄土地区（Zhou et al.，2002），1920 年 12 月 16 日，宁夏自治区海原县发生烈度Ⅷ及以上地震的区域诱发的黄土滑坡超过 10000 处，大部分分布在海原地震带上（许冲等，2018）；1968 年以来，甘肃省农业漫灌导致黑方台地区滑坡发育（Xu et al.，2014；Peng et al.，2018）；1985—1988 年，陕北地区原有的斜坡应力环境改变（雷祥义，2001）造成了 78 处崩塌，400 多孔窑洞被毁，致使 339 人死亡。黄土高原滑坡分布数量多，类型多样，因此进行黄土高原地区地质灾害发育规律系统研究对防灾减灾至关重要。

王念秦（2004）、徐张建等（2007）讨论了中国黄土滑坡的分布、滑坡类型及形成机制；彭建兵等（2014，2020）、Peng et al.（2019）指出黄土高原地区地质灾害受到区域构造应力、边坡构造应力和黄土水敏性“三大元凶”控制；王少凯（2020）根据黄土滑坡地区的地质构造、地震、土性和滑坡密度等影响因素，划分了黄土滑坡易发区，总结了区域群发规律。但这些研究缺少非滑坡灾害的分布分析，特别是缺乏对黄土高原活动性地质灾害的分布认识。

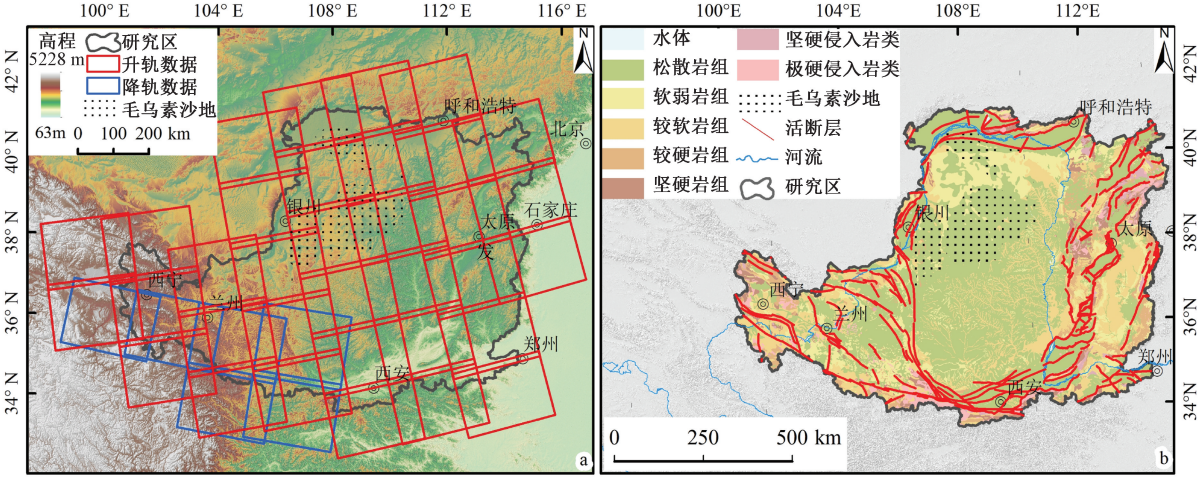
InSAR 技术具有全天候、全天时、大范围高灵敏度、非接触、高性价比观测地表变形的优势（刘星洪等，2018），是监测地表变形和活动性滑坡的有效手段（姚鑫等，2020）。部分学者通过 InSAR 技术对黄土高原的单体滑坡（何杨，2016）、矿区（郭山川等，2017）和小区域地质灾害（程滔等，2008；赵超英等，2019；韩守富等，2020）进行研究分析，取得了很好的观测效果。因此，以王正兴（2017）划分的黄土高原范围为研究区，利用 InSAR 技术、光学遥感识别和野外地质调查等手段，进行黄土高原活动性滑坡的识别，并分析其发育分布规律，这对黄土高原地质灾害的防控具有重要意义。

1　黄土高原孕灾背景

黄土高原位于中国中北部，行政区域上横跨 7 个省、自治区，地理范围为太行山以西、日月山以东，秦岭以北、阴山以南，处在从沿海向内陆，从平原向高原的过渡带（徐丽萍，2008）。研究区位于黄土高原，具体位置范围如图 1a 所示，其海拔 60~5000 m，地貌以高原、盆地、山地和沙地为主，气候受空间位置和地形地貌的影响较大，属

于温带大陆性季风气候，降水量自东南向西北逐渐递减，年平均降水量在 100~800 mm 之间，雨季多集中在 7~9 月，局部突发暴雨。

研究区出露的岩土体类型多样，地层岩性可划分为松散岩组、软弱岩组、较软岩组、较硬岩组、坚硬岩组、坚硬侵入岩类、极硬侵入岩 7 类工程地质岩组（图 1b）。受构造断裂带的影响，出露的岩组沿着断裂的走向分布，从黄土高原西部至六盘山，岩组分布方向以北西—南东向为主；从六盘山至吕梁山，主要分布松散岩组和软弱岩组，而吕梁山以东的黄土高原区域，岩组方向以北东—南西向为主。黄土高原的松散岩组主要为第四系（Q）的风积-洪积层，有黏土、粉砂质黏土及黏土质、亚黏土质古土壤、洪积砂砾层、黄土、砂、砾及黄土状黏质砂土。黄土高原随着青藏高原的抬升而相应地发生以内部大面积整体性间歇性抬升为主的新构造运动，而其四周的凹陷或地堑则在不断下沉，黄土高原这一整体地块受板块活动影响向东运动（黄汲清等，1977；闵隆瑞，1984；朱照宇，1992）。



a—研究区位置和背景数据图；b—研究区工程地质岩组和活动断裂分布

图 1　研究区 InSAR 观测范围及工程地质岩组分布

Fig. 1　InSAR observation range and enigneering geological formation-complexes distribution in the study area

(a) Location and background data; (b) Distribution of engineering geological formation-complexes and active faults

2　InSAR 处理方法及解译标准

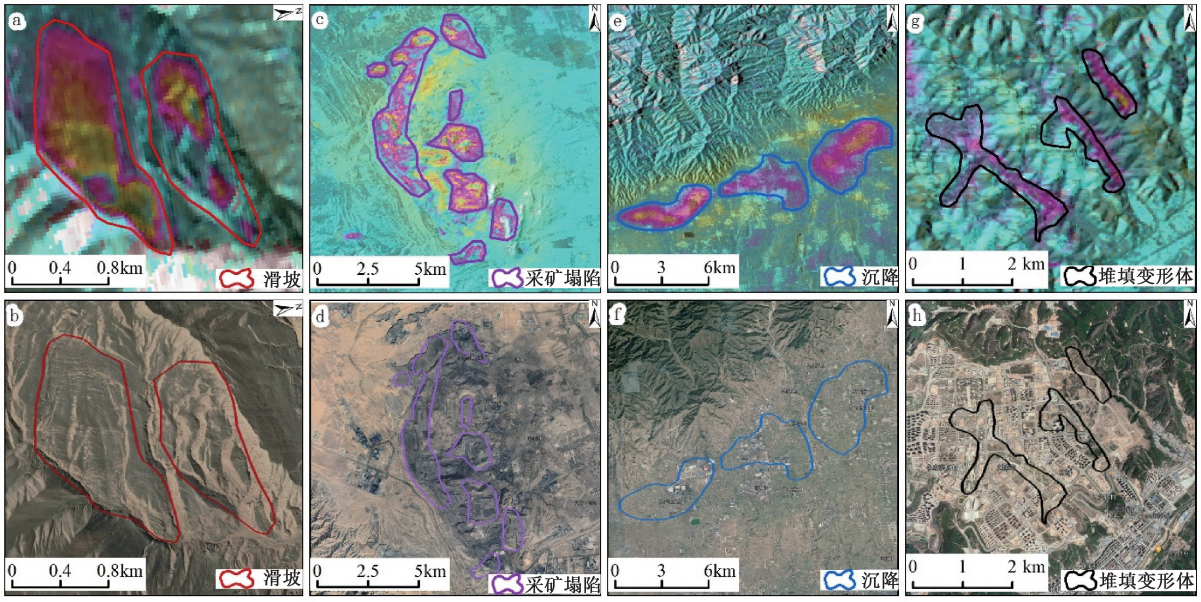
文章使用 PRE-InSAR（Phase Resonance Enhancement-Interferometric Synthetic Aperture Radar；姚鑫等，2020），即相位共振增强 InSAR 变形观测技术进行数据处理，该技术能够突出高频活动性地质灾害的空间形态特征，尽可能全面地确定灾害变形体的位置、范围和活动强度，从而高效地解译和判别变形体。采用的数据为哨兵（Sentinel-1）SAR 数据，雷达分辨率为 2.32 m×13.98 m，多视后转换到地理空间分辨率为 30 m×30 m，时相为 2019 年 1 月 1 日至 2020 年 3 月 31 日期间 40 期 PRE-InSAR 观测，以 InSAR 观测变形为主，辅助光学遥感、地质地貌特征解译活动性地质灾害。从自然资源与环境监测角度出发，主要有 4 类的 InSAR 地质灾害变形：活动性滑坡、采矿塌陷、沉降和堆填变形体，主要变形特征如下。

（1）活动性滑坡迹象明显（图 2a），分布于侵蚀河谷以及黄土梁峁沟壑区，呈现圈状、不规则状；光学遥感影像上表现出明显的滑坡地貌，伴随黄土的蠕滑拉裂现象（图 2b）。

（2）采矿塌陷迹象明显、集中发育，变形图斑呈现明显的长条形、椭圆形、串珠形（图 2c），且清晰连续；光学遥感影像上可以清晰的观测到采矿厂房以及开挖痕迹（图 2d），并时常伴随有滑坡、沉降。

（3）沉降迹象连续（图 2e），分布于平坦的城市边缘以及农田周围，比如汾渭平原；光学遥感影像上农田与居民区星罗棋布（图 2f），是由人类活动引起的沉降现象。

（4）堆填变形体迹象明显，变形图斑呈现条状分布（图 2g），并与山脊山谷相平行；光学遥感影像上表现为黄土梁峁沟壑区的平山造地，比如



a—滑坡 InSAR 变形图；b—滑坡光学影像图；c—采矿塌陷 InSAR 变形图；d—采矿塌陷光学影像图；e—沉降 InSAR 变形图；f—沉降光学影像图；g—堆填变形体 InSAR 变形图；h—堆填变形体光学影像图

图 2 黄土高原地质灾害 InSAR 变形图与光学影像图

Fig. 2 InSAR-observed deformation and optical images of geological hazards in the Loess Plateau

(a) InSAR-observed deformation image of landslides; (b) Optical image of landslides; (c) InSAR-observed deformation of mining collapses; (d) Optical image of mining collapses; (e) InSAR-observed deformation of subsidences; (f) Optical image of subsidences; (g) InSAR-observed deformation of landfills; (h) Optical image of landfills

延安市进行的城市建设（图 2h）。

利用 2019 年至 2020 年的观测结果，根据以上解译方法，结合区域内地质灾害的地貌特征和灾害发育程度，将黄土高原划分为 8 个活动性地质灾害发育区（图 3），分别为青海东缘黄河中上游滑坡发育区（Ⅰ区）；宁夏东南缘固原-西吉滑坡发育区（Ⅱ区）；甘肃庄浪-天水-张家川滑坡发育区（Ⅲ区）；陕北吴起-志丹-延安-安塞黄土滑坡发育区（Ⅳ区）；宁夏采矿塌陷灾害区（Ⅴ区）；陕北-内蒙古鄂尔多斯采矿塌陷灾害区（Ⅵ区）；山西采矿塌陷灾害区（Ⅶ区）；关中-汾渭-洛阳平原沉降发育区（Ⅷ区）。

3 活动性地质灾害主要发育区特征

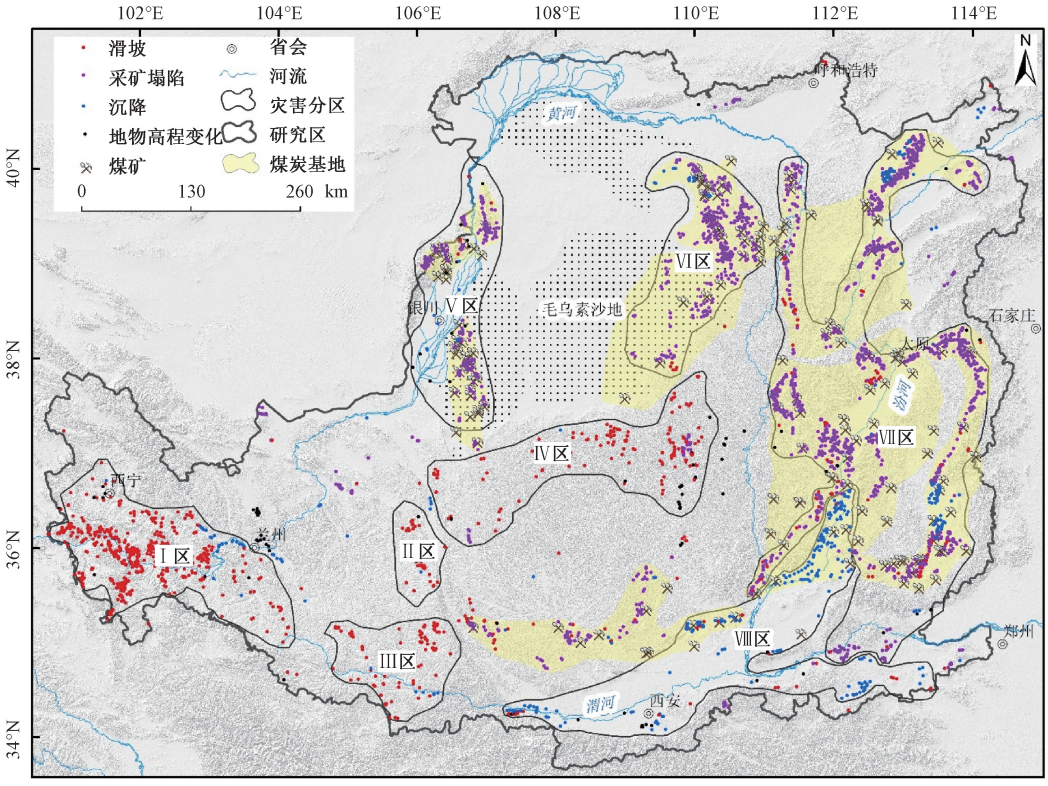
黄土高原活动性地质灾害分布在中—高海拔中起伏山地、中—高海拔黄土梁峁和低海拔冲积平原，活动性滑坡分布在中西部，采矿塌陷分布在中东部，沉降分布于汾渭平原。

3.1 黄土高原滑坡发育区

3.1.1 青海东缘黄河中上游滑坡发育区（Ⅰ区）

该滑坡发育区地貌单元以中—高海拔大起伏山地为主，黄河干流在青海省贵德县-尖扎县-循化县一带近东西向呈“W”型展布，城市聚居区域地貌为黄河阶地，海拔高程在 1800～3500 m 之间；高原草甸放牧区主要位于海拔 3000 m 以上区段。青海东缘黄河流域侵蚀滑坡段海拔相对较高，滑坡发育密集，呈现多级滑动、沿沟谷发育的特点。光学影像和 InSAR 图斑变形明显，受流域地貌控制发育。

该区滑坡变形体主要分布在山缘地带（赵东亮等，2021），海拔 3500 m 以上的变形主要为高原草甸蠕滑变形滑坡（图 4a），发生多级滑动，坡体两侧树木植被较少，在大雨、暴雨的冲刷下岩土体容易发生变形；区域地质灾害分布受河流沟谷控制，发育侵蚀多级滑坡（图 4b、4c），变形体主要为堆积层并且结构松散，微观结构多孔，固结不足，力学性质差，容易发生蠕滑变形，为滑坡的发生提供了物源条件。区域滑坡发育密集（图 4d），岩性以最上部第四系的马兰黄土以及灰-深灰-杂色砾石、粗砂、亚砂土为主，由于岩性组成多为黄土-泥岩，呈现层状结构和圈椅状地貌（图 4e），表面发育拉裂缝和落水洞，极其破碎（图 4f），所以该区域也多发育黄土-泥岩滑坡。局部地区还分



Ⅰ区—青海东缘黄河中上游滑坡发育区；Ⅱ区—宁夏东南缘固原-西吉滑坡发育区；Ⅲ区—甘肃庄浪-天水-张家川滑坡发育区；Ⅳ区—陕北吴起-志丹-延安-安塞黄土滑坡发育区；Ⅴ区—宁夏采矿塌陷灾害区；Ⅵ区—陕北-内蒙古鄂尔多斯采矿塌陷灾害区；Ⅶ区—山西采矿塌陷灾害区；Ⅷ区—关中-汾渭-洛阳平原地区沉降发育区

图 3　黄土高原活动性地质灾害分布

Fig. 3　Distribution of active geological hazards in the Loess Plateau

Area Ⅰ-Landslide development area in the upper and middle reaches of the Yellow River, eastern margin of Qinghai; Area Ⅱ-Guyuan-Xiji landslide development area in the southeastern margin of Ningxia; Area Ⅲ-Zhuanglang-Tianshui-Zhangjiachuan landslide development area in Gansu; Area Ⅳ-Wuqi-Zhidan-Yan'an-Ansai loess landslide development area in northern Shaanxi; Area Ⅴ-Mining collapse area in Ningxia; Area Ⅵ-Mining collapse area in Ordos, Inner Mongolia and Northern Shaanxi; Area Ⅶ-Mining collapse area in Shanxi; Area Ⅷ-Subsidence development area in the plain area of Guanzhong-Fenwei-Luoyang

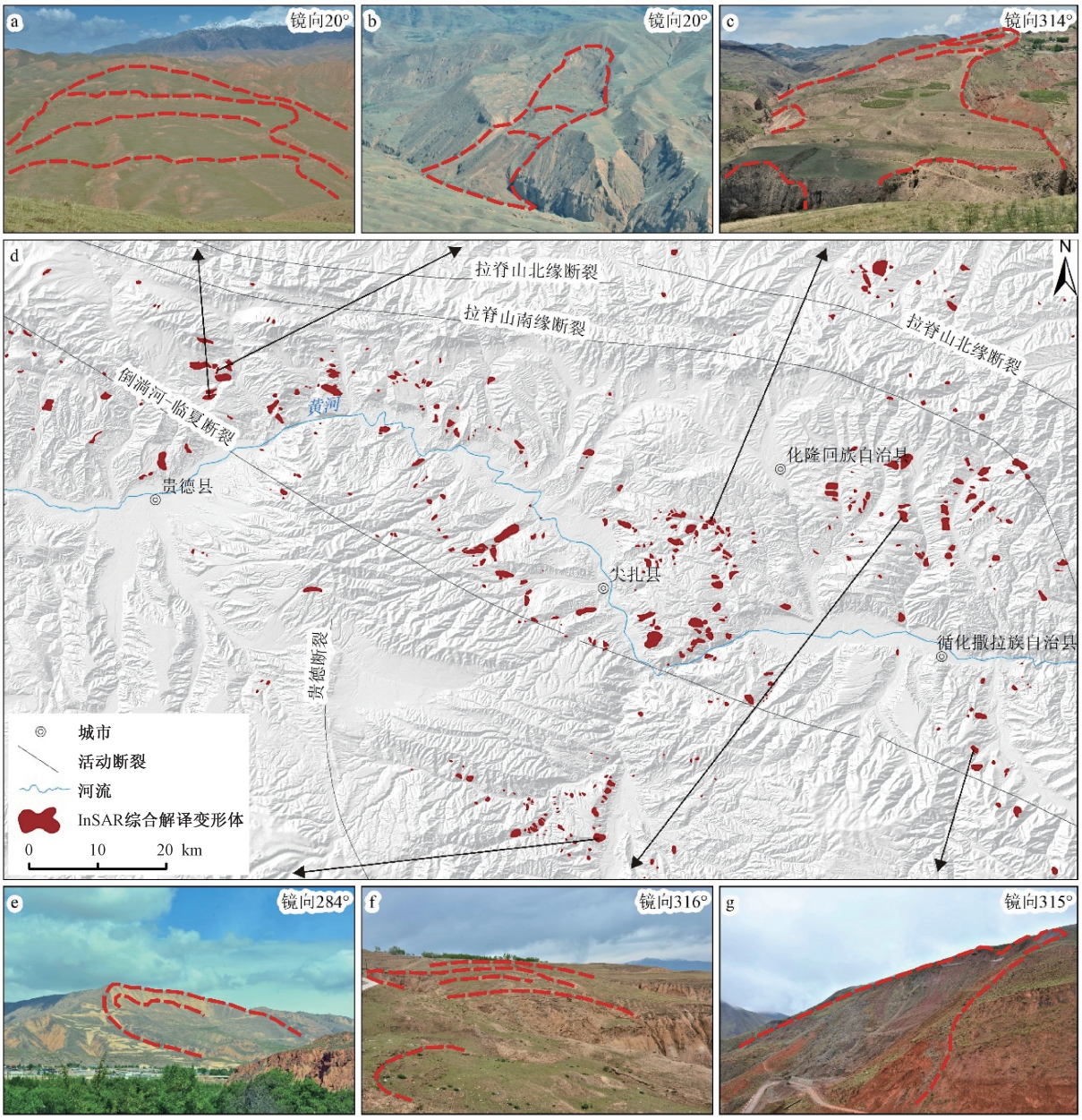
布有石英片岩及片麻岩（图 4g），岩体破碎，其中第四系和新近系的岩性地层为 InSAR 解译的活动性岩性变形体。

3.1.2　宁夏东南缘固原-西吉滑坡发育区（Ⅱ区）

该滑坡发育区地貌单元为中—高海拔黄土梁峁，位于黄土丘陵区陇东高原的东段，平均海拔高度 2000 m 以上，年降水量 400~500 mm。区域内地震活动频繁，处于中国南北向地震带北端的六盘山强震多发区，地质体破碎，发育串珠状地震堰塞湖。InSAR 解译图斑明显，单体滑坡图斑强烈，多发生中—浅层或层间滑坡，并呈团块或条带状密集分布。该区域主要有两种滑坡类型：①降雨控制型泥流滑坡，以发育规模大、密度高、低角度、高速远程为主要特点；②地震控制型复活古滑坡，滑坡形态表现为圈椅状地貌（袁丽侠，2006），并在其周围发育震湖，滑坡经人工改造成为梯田，以陡坡、低速短程为主要特点。

3.1.3　甘肃庄浪-天水-张家川滑坡发育区（Ⅲ区）

该区域主要地形地貌为构造剥蚀黄土低山丘陵区和侵蚀堆积河谷区，地貌单元为中—高海拔中起伏山地，区域内海拔高度 1200~2000 m，且区内剥蚀侵蚀作用强烈，沟谷下切，冲沟发育，溯源侵蚀严重，植被稀少。该段沟谷两侧滑坡和崩塌发育，滑坡多为黄土层内滑坡和黄土-泥岩二元结构滑坡，多呈现半圆-圈椅状地貌，后壁明显，从谷歌影像看变形迹象明显，多发生在农田和房屋周边，属于人类活动诱发型滑坡。



a—高原草甸蠕滑变形滑坡；b—侵蚀多级滑坡 1；c—侵蚀多级滑坡 2；d—滑坡分布图；e—圈椅状滑坡地貌；f—拉裂缝；g—片麻岩斜坡

图 4 青海东缘黄河流域侵蚀滑坡段及现场典型照片

Fig. 4 Map and field photos showing the eroded landslides in the Yellow River Basin, eastern margin of Qinghai

(a) Creep deformation landslide of plateau meadow; (b) Eroded multi-stage landslide 1; (c) Eroded multi-stage landslide 2; (d) Distribution of landslides; (e) Armchair-like landslide landform; (f) Tensile fracture; (g) Gneiss slope

3.1.4 陕北吴起-志丹-延安-安塞黄土滑坡发育区（Ⅳ区）

该发育区位于鄂尔多斯地台，地貌单元为中海拔黄土梁峁，区域内海拔 1000~1600 m，历经多次黄土堆积和侵蚀作用，地形破碎，川塬相间，沟壑纵横，地势起伏较大。受河流沟谷演化过程的影响，该区段滑坡呈片状、线状密集分布，发育贯穿裂缝，表面破碎，易受地区暴雨影响，极易发生变形。该区域处于青藏高原的东北部，由于青藏高原的影响，使黄土高原区域极易形成气旋型漩涡，造成该地区多暴雨，滑坡的发育带与 400 mm 年等降雨线相平行，地质灾害多为多日降水诱发型和沟谷发育控制型滑坡（李明等，2009）。

3.2 黄土高原采矿塌陷分布

依据 InSAR 识别结果，划分出宁夏采矿塌陷

灾害区（Ⅴ区）、陕北-内蒙古鄂尔多斯采矿塌陷灾害区（Ⅵ区）和山西采矿塌陷灾害区（Ⅶ区）。山西省目前是中国最大的能源重化工基地，但其矿产开采形成的采空区给山西省造成了严重的环境地质问题（曹金亮等，2004）。宁夏自治区的矿产资源主要分布在中北部和东部，分别集中在乌海和宁东基地，其中最大的矿区为灵武矿区。通过 InSAR 监测，可以发现在 2019 年至 2020 年期间部分煤矿区域没有进行开采活动（图 3）。

采矿塌陷灾害区在 InSAR 图像上表现为长条形、椭圆形、近圆形、串珠形、不规则形，并且成群分布。InSAR 图斑的分布基本和山西省煤田产地相重合，反映出了山西省的煤矿资源分布状况（图 3），也间接说明了 InSAR 技术能够监测自然资源的开采情况。InSAR 技术在山西省、宁夏自治区、陕西省、内蒙古自治区的应用表明，其可以有效监测到地下和地上由于煤矿开采活动诱发的煤系地层边坡和地表破坏的分布、范围、强度，并可反映出塌陷灾害与煤矿生产活动的关系。

3.3　黄土高原沉降区

通过 InSAR 图斑和谷歌光学影像识别，划分出关中-汾渭-洛阳平原地区沉降发育区（Ⅷ区），共解译了地面沉降 368 处，分布在汾渭平原、兰州黄土梁峁区的台塬上及其周边。汾渭平原沉降区域位于汾渭裂谷，因地质构造作用导致的凹陷拉张，为沉降变形提供了作用力；大量开采地下水破坏了岩土力学平衡，促进了沉降灾害的发生。对于黄土梁峁区，地面沉降的主要诱发原因是灌溉，同时沉降也加剧了台塬周边滑坡灾害的发生。

4　灾害点的空间分布规律

综合 InSAR 变形图和多时相光学遥感图像，通过 Sentinel-1 升降轨观测结果共解译地质灾害 InSAR 变形体 3286 处，空间密度为 52.6 处/10^4 km^2，与其他学者在陕西子长（程滔等，2008）、甘肃黑方台（赵超英等，2019）、陕西绥德县城（韩守富等，2020）等小区域 InSAR 观测结果整体相符，但此次研究的 InSAR 观测结果，图斑识别性强，覆盖面广，更能突出地质灾害近一年以来的发育规律。

4.1　与地层岩性相关性

从各岩土体类型所发育的地质灾害数量上来分析，数量最多的是较软岩组，共计 1206 处，占黄土高原地区地质灾害总数的 37%；松散岩组中发育地质灾害共计 1196 处，占地质灾害总数的 36%，软弱岩组中发育地质灾害 700 处，占地质灾害总数的 21%；较硬岩组、坚硬岩组、坚硬侵入岩类和极硬侵入岩类中发育地质灾害分别为 85 处、60 处、12 处和 27 处，合计占地质灾害总数的 6%（表 1）。

表 1　黄土高原研究区各岩土体类型地质灾害发育情况

Table 1　Development of geological hazards in different types of rocks and soil in the study area

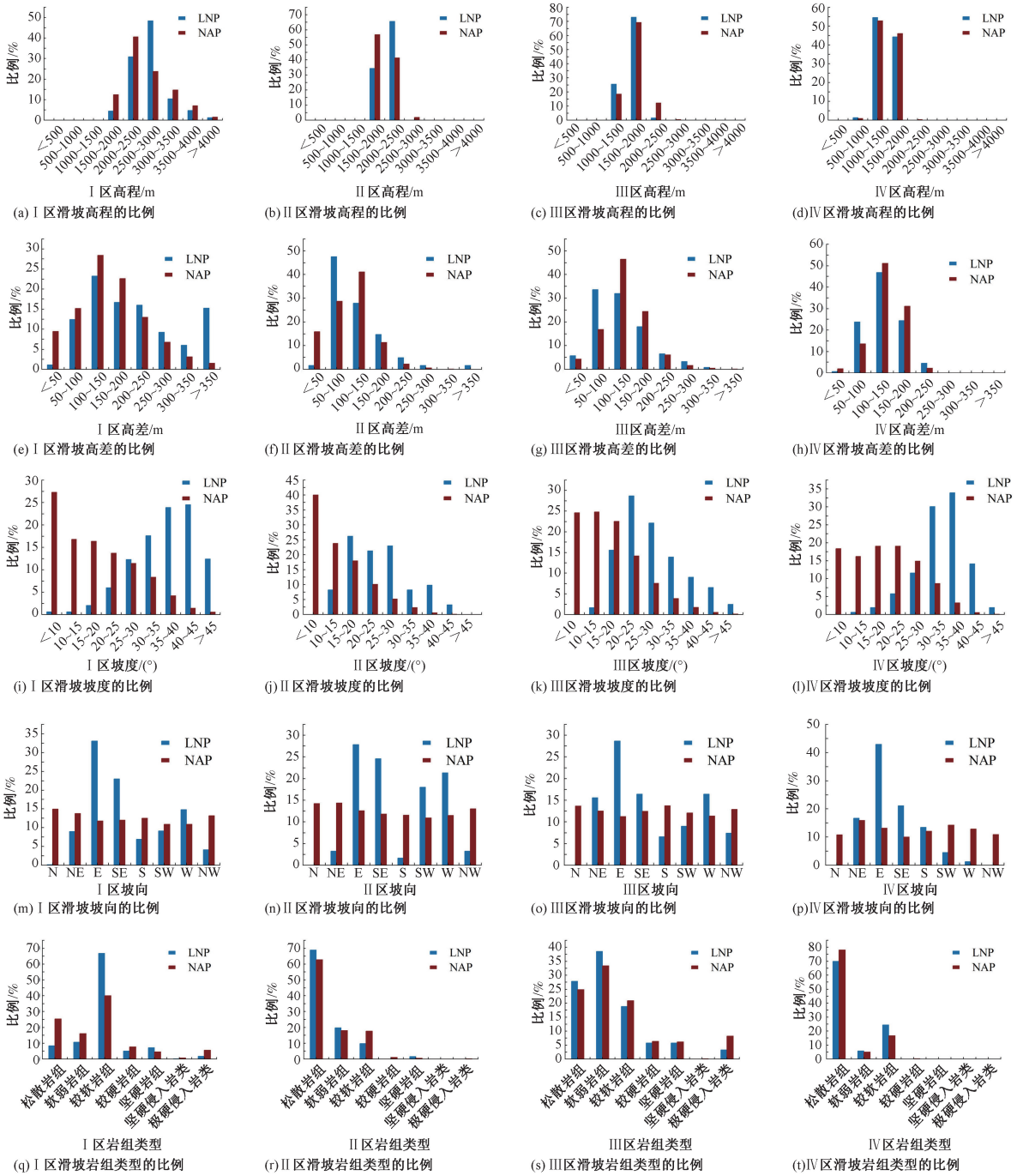
岩土体类型	滑坡/处	采矿塌陷/处	沉降/处	堆填开挖变形/处	合计
松散岩组	290	539	306	61	1196
软弱岩组	186	478	29	7	700
较软岩组	535	623	31	17	1206
较硬岩组	44	37	0	4	85
坚硬岩组	56	3	1	0	60
坚硬侵入岩类	3	8	1	0	12
极硬侵入岩类	21	3	0	3	27
合计	1135	1691	368	92	3286

采矿塌陷是黄土高原发育数量最多的灾种，共计 1691 处，占黄土高原灾害总数的 51.5%，其中 1640 处是发育在松散岩组、软弱岩组和较软岩组当中；滑坡发育 1135 处，占黄土高原总数的 35%，松散岩组、软弱岩组和较软岩组中发育滑坡 1011 处（表 1）。

4.2　滑坡灾害与地貌的相关性

活动性滑坡是指在调查观测时可以发现当时正发生变形或破坏的滑坡，通过对活动性滑坡高程、高差、坡度、坡向和岩组类型统计分析，可以看出活动性滑坡的分布与地貌具有密切的相关性（图 5）。其中，LNP（landslide number percentage in each unit）为活动性滑坡数量在各个分区中不同区段数量的百分比；NAP（nature area percentage in each unit）为活动性滑坡面积在各个分区中不同区段面积的百分比。

黄土高原最易发活动性滑坡地貌区段统计见表 2，四个滑坡区域所处地貌单元不同，故其滑坡的高程区间也不同（图 5a—5d）。高差方面，滑坡的发育率呈现典型的单峰特征（图 5e—5h）；Ⅰ区高差 50～250 m 区域，LNP 为 68.4%，NAP 为 79.17%，其中 100～150 m 高差 NAP 为 23.27%；Ⅱ区 50～100 m 高差 NAP 为 47.54%；Ⅲ区 50～100 m 高差 NAP 为 33.61%；Ⅳ区 100～150 m 区域



(a)Ⅰ区滑坡高程的比例 (b)Ⅱ区滑坡高程的比例 (c)Ⅲ区滑坡高程的比例 (d)Ⅳ区滑坡高程的比例

(e)Ⅰ区滑坡高差的比例 (f)Ⅱ区滑坡高差的比例 (g)Ⅲ区滑坡高差的比例 (h)Ⅳ区滑坡高差的比例

(i)Ⅰ区滑坡坡度的比例 (j)Ⅱ区滑坡坡度的比例 (k)Ⅲ区滑坡坡度的比例 (l)Ⅳ区滑坡坡度的比例

(m)Ⅰ区滑坡坡向的比例 (n)Ⅱ区滑坡坡向的比例 (o)Ⅲ区滑坡坡向的比例 (p)Ⅳ区滑坡坡向的比例

(q)Ⅰ区滑坡岩组类型的比例 (r)Ⅱ区滑坡岩组类型的比例 (s)Ⅲ区滑坡岩组类型的比例 (t)Ⅳ区滑坡岩组类型的比例

Ⅰ区—青海东缘黄河中上游滑坡发育区；Ⅱ区—宁夏东南缘固原-西吉滑坡发育区；Ⅲ区—甘肃庄浪-天水-张家川滑坡发育区；Ⅳ区—陕北吴起-志丹-延安-安塞黄土滑坡发育区

图 5 黄土高原活动性滑坡地貌因子统计

Fig. 5 Statistics of geomorphologic factors of active landslides in the Loess Plateau

Area Ⅰ-Landslide development area in the upper and middle reaches of the Yellow River, eastern margin of Qinghai; Area Ⅱ-Guyuan-Xiji landslide development area in the southeastern margin of Ningxia; Area Ⅲ-Zhuanglang-Tianshui-Zhangjiachuan landslide development area in Gansu; Area Ⅳ-Wuqi-Zhidan-Yan'an-Ansai loess landslide development area in northern Shaanxi

高差 NAP 为 46.79%。对坡度而言，滑坡发育规律不明显（图 5i—5l）；Ⅰ区 40°~45°为最易滑坡度，NAP 为 24.53%；Ⅱ区 15°~20°范围为最易滑坡度，NAP 为 26.23%；Ⅲ区 20°~25°为最易滑坡度；Ⅳ区 35°~40°为最易滑坡度，NAP 为 33.97%。坡向方面规律具有一致性（图 5m—5p），

滑坡发育优势坡向为东西向坡，主要原因是黄土高原滑坡主要分布在垂直于东西向的干流沟谷内（如黄河）。岩组类型上（图 5q—5t），滑坡主要发育在较软岩组、软弱岩组和松散岩组中。

表 2　黄土高原最易发活动性滑坡地貌区段统计

Table 2　Statistics of the geomorphic sections most prone to active landslides in the study area

区域	Ⅰ区	Ⅱ区	Ⅲ区	Ⅳ区
高程/m	2500~3000	2000~2500	1500~2000	1000~1500
高差/m	100~150	50~100	50~100	100~150
坡度/（°）	40~45	15~20	20~25	35~40
坡向	东	东	东	东
岩组类型	较软岩组	松散岩组	软弱岩组	松散岩组

以上统计表明，滑坡分布高程主要是因海拔高程差异而出现不同；高差和坡度方面，滑坡的发育率呈现典型的单峰特征，坡向上表现为二向性，东西向坡，岩性越松散、软弱，滑坡发育率越高。

5　讨论

InSAR 解译的活动性地质灾害有 3000 余处，对于广阔的黄土高原，有进一步深化完善的空间。主要是因为：①在数据方面，研究区 Sentinel-1 降轨数据部分缺失，仅有升轨观测，覆盖时间只有 1 年多，结果仅反映该时空条件下的活动地质灾害发育情况；②数据处理方面，文章使用的 PRE-InSAR 技术识别滑坡灾害体的规模在中型以上，对于那些小型、微弱变形灾害的识别效果不明显；③滑坡识别解译过程中，通过 InSAR 解译变形图斑和谷歌遥感影像，辅以地质要素信息进行变形体的判别，与现场“以人为主”“房前屋后”为特征的 1∶5万地质灾害数据（胡胜，2019；孙萍萍等，2019）存在一定的差异。因此，为了对活动性地质灾害进行持续动态的观测识别，需要在下一步的研究中尽可能多的使用多源、多波段、多时相的观测数据，从而更完整的识别活动性地质灾害。

黄土高原地质灾害的分布受到青藏高原隆升、秦-祁-昆造山系的右旋运动、鄂尔多斯陆块的左旋运动，以及发生在黄土高原地区近几千年来地震活动的影响，这极大的改变了黄土高原的地形地貌和黄土结构的应力场，而黄土自身具湿陷性，易受降雨因素影响，从北向南黄土粒度、滑坡的群发性、年降雨量和植被覆盖指数在不断增大，这影响了黄土边坡的稳定性，控制了黄土高原地区地质灾害的群发性。因此，对于四大滑坡灾害发育区，区域构造和地震为其分布和发育提供内驱动力，沟谷型地貌为滑坡灾害的发生提供了空间和物源条件，降雨和人类活动作为外驱动力加快了地质灾害的发生；对于采矿塌陷区域和沉降分布区域，城市用地的建设和油气矿产资源的开发，致使地表和地下发生形变和采空，其采空区域正好映射了黄土高原煤矿、油气资源的分布。

6　结论

文章首次对中国黄土高原地区活动性地质灾害开展了系统的 InSAR 识别和规律分析，得到主要认识如下。

（1）在研究区 62.46×10^4 km^2 的范围里，采用 2019 年 1 月 1 日至 2020 年 3 月 31 日期间 40 期 SAR 数据进行 PRE-InSAR 观测，获得了高质量的变形图像，共解译了 4 类活动性地质灾害 3286 处，其中滑坡 1135 处、采矿塌陷区域 1691 处、沉降 368 处、堆填变形体 92 处。

（2）研究区可划分 8 个灾害发育区，分别为青海东缘黄河中上游滑坡发育区（Ⅰ区）；宁夏东南缘固原-西吉滑坡发育区（Ⅱ区）；甘肃庄浪-天水-张家川滑坡发育区（Ⅲ区）；陕北吴起-志丹-延安-安塞黄土滑坡发育区（Ⅳ区）；宁夏采矿塌陷灾害区（Ⅴ区）；陕北-内蒙古鄂尔多斯采矿塌陷灾害区（Ⅵ区）；山西采矿塌陷灾害区（Ⅶ区）；关中-汾渭-洛阳平原地区沉降发育区（Ⅷ区）。

（3）活动性滑坡在空间分布上具有显著的区域性和丛集性，主要分布在中西部；采矿塌陷和地面沉降分布在中东部，密集且成群发育。统计发现，岩性越松散、软弱，滑坡发育率越高。黄土高原滑坡主要分布在垂直于黄河的支流沟谷内，东西向坡，高差 50~150 m 滑坡的发育率呈现典型的单峰特征。灾害发育的地域性差别主要受控于地形地貌和煤矿资源的分布，除此之外还与地质构造、地层岩性、地震活动和人类活动有关。

（4）采矿塌陷结果与山西、陕西、内蒙古等地的煤业活动对照分析表明，InSAR 可以有效监测到地下采煤诱发的地表破坏的分布、范围和强度，以及露天采煤矿坑深度和范围的拓展，进而推断

煤业生产活动强度。

致谢：感谢审稿专家和编辑部提出的指导与修改意见，对提高论文质量有很大的帮助。

References

CAO J L, WANG R F, ZHANG J P, et al., 2004. Environmental geological problems in mining areas in Shanxi Province and present state of their study [J]. Geological Bulletin of China, 23 (11): 1119-1126. (in Chinese with English abstract)

CHENG T, SHAN X J, DONG W T, et al., 2008. A study of landslide distribution in loess area with InSAR [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 35 (1): 98-101. (in Chinese with English abstract)

GUO S C, HOU H P, ZHANG S L, et al., 2017. Surface deformation monitoring of the mining area in Loess Plateau based on D-InSAR [J]. Science of Surveying and Mapping, 42 (6): 207-212. (in Chinese with English abstract)

HAN S F, ZHAO B Q, YIN Z M, et al., 2020. The identification of potential geological hazards on the Loess Plateau based on PS InSAR technology [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 56 (1): 1-7. (in Chinese with English abstract)

HE Y, 2016. Identification and Monitoring of the loess landslide by using of high resolution remote sensing and InSAR [D] Xi'an: Chang'an University. (in Chinese with English abstract)

HU S, 2019. Spatial pattern of landslide in Loess Plateau and its influence on geomorphologic evolution [D]. Xi'an: Northwest University. (in Chinese with English abstract)

HUANG T K, JEN C S, JIANG C F, et al., 1977. An outline of the tectonic characteristics of China [J]. Acta Geological Sinica (2): 117-135. (in Chinese with English abstract)

LEI X Y, 2001. Geological disasters and human activities on the Loess Plateau of China [M]. Beijing: Geological Press. (in Chinese)

LI M, DU J W, GAO W Y, 2009. Study on the relationship between geological disasters and precipitation in the Loess Plateau in north Shaanxi Province [J]. Arid Zone Research, 26 (4): 599-606. (in Chinese with English abstract)

LI Y, MENG H, DONG Y, et al., 2004. Main Types and characterisitics of geo-hazard in China: Based on the results of geo-hazard survey in 290 counties [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 15 (2): 29-34. (in Chinese with English abstract)

LIU X H, YAO X, ZHOU Z K, et al., 2018. Study of the technique for landslide rapid recognition by InSAR [J]. Journal of Geomechanics, 24 (2): 229-237. (in Chinese with English abstract)

MIN L R, 1984. The Tectonic movement of quaternary in Loess Plateau of China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences (9): 225-236. (in Chinese with English abstract)

PENG D L, XU Q, LIU F Z, et al., 2018. Distribution and failure modes of the Landslides in Heitai Terrace, China [J]. Engineering Geology, 236: 97-110.

PENG J B, LIN H Z, WANG Q Y, et al., 2014. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 22 (4): 684-691. (in Chinese with English abstract)

PENG J B, WANG S K, WANG Q Y, et al., 2019. Distribution and genetic types of loess landslides in China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 170: 329-350.

PENG J B, WANG Q Y, ZHUANG J Q, et al., 2020. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 26 (5): 714-730. (in Chinese with English abstract)

SUN P P, ZHANG M S, CHENG X J, et al., 2019. On the regularity of geological hazards on the Loess Plateau in China [J]. Mountain Research, 37 (5): 737-746. (in Chinese with English abstract)

WANG N Q, 2004. Study on the growing laws and controlling measures for loess landslide [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)

WANG S K, 2020. Study on the mechanisms for geohazards of macro loess discontinuities [D]. Xi'an: Chang'an University. (in Chinese with English abstract)

WANG Z X, 2017. Boundary data of Loess Plateau region [J]. Journal of Global Change Data & Discovery, 1 (1): 113, 236. (in Chinese with English abstract)

XU C, WU X Y, XU X W, 2018. Earthquake-triggered landslides in the loess plateau and its adjacent areas [J]. Journal of Engineering Geology, 26 (S1): 260-273. (in Chinese with English abstract)

XU L, DAI F C, TU X B, et al., 2014. Landslides in a Loess Platform, North-West China [J]. Landslides, 11 (6): 993-1005.

XU L P, 2008. Influence and reciprocal effects of vegetation rehabilitation on regional climate in Loess Plateau [D] Yangling: Northwest A&F University. (in Chinese with English abstract)

XU Z J, LIN Z G, ZHANG M S, 2007. Loess in China and loess landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26 (7): 1297-1312. (in Chinese with English abstract)

YAO X, DENG J H, LIU X H, et al., 2020. Primary recognition of active landslides and development rule analysis for pan Three-river-parallel Territory of Tibet Plateau [J]. Advanced Engineering Sciences, 52 (5): 16-37. (in Chinese with English abstract)

YUAN L X, 2006. Forming mechanism of the Loess Landslides in Xiji of Ningxia with Low-Angle, High speed and far-distance [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 26 (2): 219-223. (in Chinese)

ZHAO C Y, LIU X J, ZHANG Q, et al., 2019. Research on loess landslide identification, monitoring and failure mode with InSAR technique in Heifangtai, Gansu [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44 (7): 996-1007. (in Chinese with English abstract)

ZHAO D L, LANCUO Z M, HOU G L, et al., 2021. Assessment of geological disaster susceptibility in the Hehuang Valley of Qinghai Province [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 83-95. (in Chinese with English abstract)

ZHOU J X, ZHU C Y, ZHENG J M, et al., 2002. Landslide disaster in the loess Area of China [J]. Journal of Forestry Research, 13 (2): 157-161.

ZHU Z Y, 1992. Neotectonics and Neotectonic movement of the Loess Plateau and its adjacent regions [J]. Quaternary Sciences, 12 (3): 252-264. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

曹金亮，王润福，张建萍，等，2004. 山西省矿山环境地质问题及其研究现状 [J]. 地质通报，23 (11): 1119-1126.

程滔，单新建，董文彤，等，2008. 利用 InSAR 技术研究黄土地区滑坡分布 [J]. 水文地质工程地质，35 (1): 98-101.

郭山川，侯湖平，张绍良，等，2017. D-InSAR 的黄土高原矿区地表形变监测 [J]. 测绘科学，42 (6): 207-212.

韩守富，赵宝强，殷宗敏，等，2020. 基于 PS InSAR 技术的黄土高原地质灾害隐患识别 [J]. 兰州大学学报：自然科学版，56 (1): 1-7.

何杨，2016. 高分遥感与 InSAR 技术在黄土滑坡识别和监测中的应用研究 [D]. 西安：长安大学.

胡胜，2019. 黄土高原滑坡空间格局及其对地貌演化的影响 [D]. 西安：西北大学.

黄汲清，任纪舜，姜春发，等，1977. 中国大地构造基本轮廓 [J]. 地质学报 (2): 117-135.

雷祥义，2001. 黄土高原地质灾害与人类活动 [M]. 北京：地质出版社.

李明，杜继稳，高维英，2009. 陕北黄土高原区地质灾害与降水关系 [J]. 干旱区研究，26 (4): 599-606.

李媛，孟晖，董颖，等，2004. 中国地质灾害类型及其特征：基于全国县市地质灾害调查成果分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报，15 (2): 29-34.

刘星洪，姚鑫，周振凯，等，2018. 滑坡灾害 InSAR 应急排查技术方法研究 [J]. 地质力学学报，24 (2): 229-237.

闵隆瑞，1984. 中国黄土高原第四纪构造运动 [J]. 中国地质科学院院报 (9): 225-236.

彭建兵，林鸿州，王启耀，等，2014. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路 [J]. 工程地质学报，22 (4): 684-691.

彭建兵，王启耀，庄建琦，等，2020. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制 [J]. 地质力学学报，26 (5): 714-730.

孙萍萍，张茂省，程秀娟，等，2019. 黄土高原地质灾害发生规律 [J]. 山地学报，37 (5): 737-746.

王念秦，2004. 黄土滑坡发育规律及其防治措施研究 [D]. 成都：成都理工大学.

王少凯，2020. 黄土宏观界面及其控灾机制研究 [D]. 西安：长安大学.

王正兴，2017. 黄土高原地区 [J]. 全球变化数据学报 (中英文)，1 (1): 113, 236.

许冲，吴熙彦，徐锡伟，2018. 黄土高原及邻区的地震滑坡 [J]. 工程地质学报，26 (S1): 260-273.

徐丽萍，2008. 黄土高原地区植被恢复对气候的影响及其互动效应 [D]. 杨凌：西北农林科技大学.

徐张建，林在贯，张茂省，2007. 中国黄土与黄土滑坡 [J]. 岩石力学与工程学报，26 (7): 1297-1312.

姚鑫，邓建辉，刘星洪，等，2020. 青藏高原泛三江并流区活动性滑坡 InSAR 初步识别与发育规律分析 [J]. 工程科学与技术，52 (5): 16-37.

袁丽侠，2006. 宁夏西吉县低角高速远程黄土滑坡及其形成机理分析 [J]. 防灾减灾工程学报，26 (2): 219-223.

赵超英，刘晓杰，张勤，等，2019. 甘肃黑方台黄土滑坡 InSAR 识别、监测与失稳模式研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版)，44 (7): 996-1007.

赵东亮，兰措卓玛，侯光良，等，2021. 青海省河湟谷地地质灾害易发性评价 [J]. 地质力学学报，27 (1): 83-95.

朱照宇，1992. 黄土高原及邻区新构造与新构造运动 [J]. 第四纪研究，12 (3): 252-264.