

地形对黄土高原滑坡的影响

胡 胜^{1,2,3}, 邱海军^{1,2,3}, 王宁练^{1,2,3}, 崔一飞⁴, 曹明明¹, 王家鼎^{3,5}, 王新刚^{3,5}

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 3. 西北大学地表系统与灾害研究院, 西安 710127; 4. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 5. 西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069)

摘要: 高分辨率地形与影像数据的缺乏已成为研究地表现象、特征与过程的重要瓶颈。低成本无人机设备和摄影测量技术的发展, 打开了地学领域获取高分辨率数据的大门, 大大提高了地质灾害野外调查与灾害编目的精度与效率。本文通过无人机野外调查和遥感室内目视解译, 构建了一个包含307个黄土滑坡属性的数据库。在此基础上, 通过数字地形分析和数理统计等方法, 总结归纳了黄土滑坡样本数据的分布规律, 探讨了地形对黄土滑坡分布的影响, 阐述了地形相对高差对最长滑动距离、滑坡周长、滑坡面积的影响, 提出了基于传统经验公式拟合的滑坡规模快速预测公式。结果表明: ① 滑坡规模—频率分布具有明显的规律性, 不同最大长度、最大宽度和周长的黄土滑坡数量分布均呈现正偏态分布, 而不同面积的滑坡数量分布则服从幂函数分布; ② 地形对黄土滑坡发育控制作用明显, 不同地形高差、平均坡度、坡形的斜坡单元滑坡发育数量差异较大; ③ 地形相对高差与滑坡的最长滑距、周长和面积的拟合曲线很好地符合幂律分布规律, 但不同地形区的拟合效果有所差异, 黄土丘陵区拟合效果最好, 黄土高原全区次之, 黄土台塬区最差; ④ 本文建立的黄土滑坡规模快速预测模型, 为黄土滑坡灾害调查提供了经验公式支撑。

关键词: 高分辨率; 地形; 黄土滑坡; 黄土高原

DOI: 10.11821/dlxb202111008

1 引言

中国四大高原之一的黄土高原, 是中华文明发祥地之一, 也是世界上黄土分布最为集中、覆盖面积最大的黄土区^[1]。黄土是第四纪以来, 在干旱半干旱的气候条件下, 由风力作用和成土作用所形成的松散堆积物。它的分布范围非常广泛, 涉及到亚、欧、南北美洲。中国黄土的分布范围西起新疆塔里木盆地、准噶尔盆地边缘, 东至松辽平原东部, 南抵秦岭北侧, 北至长城, 面积达63万km², 占国土总面积的6.6%^[2-3]。黄土高原地处中国东部季风区与非季风区、半湿润区与半干旱区、森林与草地、农业与牧业的过渡地带。地理位置的特殊性, 导致黄土高原不仅是中国乃至世界上水土流失严重区、生态环境敏感区与脆弱区, 而且也是地质灾害频发高发的地区^[4-6]。据不完全统计, 黄土高原

收稿日期: 2020-06-22; 修订日期: 2021-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(42001006, 41771539); 中国博士后科学基金(2019M663792); 西北大学科研启动基金(360051900075) [**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No.42001006, No.41771539; China Postdoctoral Science Foundation, No.2019M663792; Scientific Research Foundation of Northwest University, No.360051900075]

作者简介: 胡胜(1988-), 男, 湖北枣阳人, 博士后, 中国地理学会会员(S110014073M), 主要从事黄土地质灾害研究。

E-mail: shenghu@nwu.edu.cn

通讯作者: 邱海军(1983-), 男, 陕西神木人, 博士, 教授, 主要从事山地灾害研究。E-mail: haijunqiu@nwu.edu.cn

2697-2709 页

仅滑坡数量已超过 14544 个^[7]。第四纪以来,伴随着地壳间歇性上升过程,黄土高原地区的风成黄土也在不断地沉积,厚度不断增加,加之受到降雨和河流作用的侵蚀,大多数黄土斜坡仅仅维持在临界平衡状态^[8]。随着人类经济活动和工程活动的加剧,比如采矿、修路、开挖边坡、农业灌溉、城市扩张等,这种临界平衡状态很容易被打破而发生灾难性事故。因此,黄土滑坡灾害极大地威胁着黄土高原人民群众的生命、财产安全,不仅制约了当地社会经济的可持续发展^[8],而且它已经成为推动黄河流域生态保护和高质量发展的重要瓶颈。

通常地理学家或地质学家们往往更侧重关注黄土滑坡的成因、特征、机理、风险评估、稳定性分析等^[5, 9-10]。以往由于高分辨率地形数据的缺乏,地形对黄土滑坡的影响很难被准确地统计分析。因此,传统的 30 m×30 m 分辨率 DEM (Digital Elevation Model) 已经很难满足精细化滑坡灾害调查与数字地形分析。然而,理解地表过程依赖于现代数字地形模型,并在很大程度上取决于地形数据的质量^[11]。传统野外地质灾害调查耗费大量的人力、物力和财力,且仅能获取黄土滑坡宏观的、不够精确的特征参数,有些滑坡地形复杂,还会对调查人员的人身安全构成很大威胁。遥感技术在过去几十年的地质灾害调查与监测方面发挥了重要作用^[12-14]。2000 年以来,随着无人机摄影测量技术^[12, 15-16]、InSAR 技术^[17-18]、雷达技术^[11, 19]、三维激光扫描技术^[12, 20]等先进测量技术的发展,为高分辨率滑坡地形数据的获取和地形分析提供了技术支持,也为在坡面尺度下深入探讨和研究滑坡与地貌演化关系提供了机遇与可能。但同时也应注意到,目前由于高分辨率、大比例尺的地形数据难以获取,已严重制约了相关研究的开展^[21]。比如,黄土滑坡地貌特征定量化分析就十分依赖高分辨率和高精度的地形数据。因此,探索一种廉价、高效、安全、省时省力的地质灾害调查方法来获取滑坡的高分辨率地形和影像,对于准确认识黄土滑坡的地形特征、表面特征和形态结构具有重大意义。为了弥补中国黄土滑坡高分辨率地形和影像数据缺乏的现状,研究团队成员在 2017 年 3 月—2018 年 11 月,利用无人机在黄土高原六大线路开展了野外调查,最终获取了 108 个高分辨率的黄土滑坡地形和影像数据^[22]。

滑坡是一种时而缓慢、时而快速的地表过程。与其他地表过程相比,滑坡已成为重塑山体或斜坡的重要地表过程或形成机制^[23-25]。同时,地貌演化也会进一步加剧滑坡的形成。二者相互作用,相互影响,密不可分。通过大量的野外调查发现^[16, 26-27],黄土滑坡与地形地貌的相互作用关系在黄土高原表现的尤为显著。基于此,本文通过无人机野外调查和购买 ALOS (Advanced Land Observing Satellite) 的 AW3D (ALOS World 3D) -5m DSM (Digital Surface Model) 数据,进行了黄土滑坡解译与特征参数提取,构建了高分辨率的黄土高原滑坡数据库。并利用数字地形分析、数理统计与分析等方法,探究了地形对黄土滑坡分布的影响,阐述了相对高差与滑坡几何特征参数的关系,提出了基于传统经验公式拟合的滑坡规模(面积)快速估算公式。本文为探讨地形对黄土高原滑坡的影响和建立黄土滑坡规模(面积)的快速估算模型提供了重要支撑。

2 黄土高原滑坡概况

黄土高原东西长 1000 km,南北宽 750 km,地理空间范围辐射太行山以西、青海省日月山以东、秦岭以北、长城以南的广大地区,位于中国地势第二级阶梯之上,海拔高度 90~5010 m,地势由西北向东南倾斜。黄土高原在长期的地貌演化过程中,形成了千沟万壑、支离破碎的自然景观,成千上万的滑坡灾害分布其中(图 1)。黄土滑坡是在区

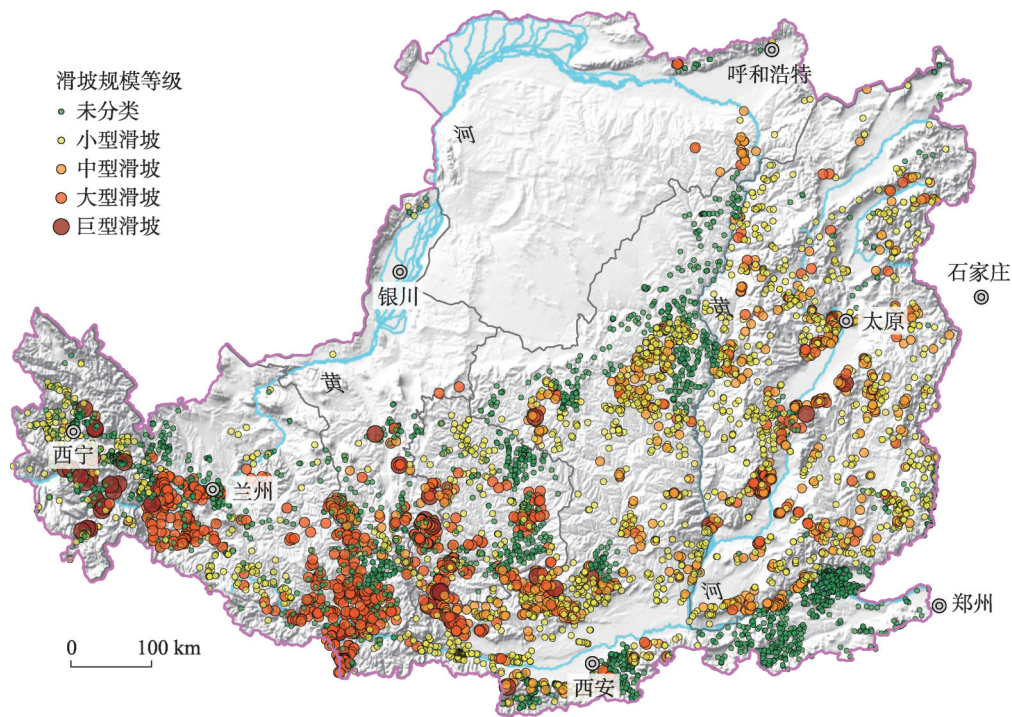


图1 黄土高原不同规模等级滑坡空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of loess landslides on different scales in Loess Plateau

内地质构造、地形地貌、地层岩性、新构造运动、气象气候、水文、植被、土壤、土地利用、地震、人类活动等孕灾环境共同作用下发生的^[1]。据不完全统计，黄土高原现存滑坡数量超过14544个^[7]。图2为黄土高原典型黄土滑坡的位置与野外照片。雷祥义^[28]按照人类触发黄土滑坡的工程—经济活动性质与作用的地貌部位，将黄土滑坡分为5种类型：①改变地下水水位型黄土滑坡；②坡脚挖方型黄土滑坡；③坡面毁林毁草垦田型黄土滑坡；④坡顶（面）加荷型黄土滑坡；⑤底部采空型黄土滑坡。黄土高原6—9月是地质灾害的高发期，多雨期连续性降雨或暴雨是导致黄土滑坡形成的重要原因。此外，在局部地区，冬春季的冻融作用也会引发地质灾害。根据中国国家统计局（<http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>）统计资料显示，黄土高原及周边省区2008—2017年地质灾害共发生13945起，人员伤亡3567人，地质灾害造成人员死亡2302人，直接经济损失110亿元，地质灾害防治项目累计6388个，防灾项目投资154亿元。本区地质灾害损失最为严重的省份是甘肃省和陕西省。青海、内蒙古和宁夏地质灾害损失最低。

3 数据与方法

3.1 数据来源

研究数据来源如表1所示。① 无人机野外调查数据：本团队在黄土高原开展了数年的无人机野外调查工作，获取了高分辨率的滑坡地形、影像和三维模型数据。为便于开展滑坡特征参数提取和地形分析，将获取的地形数据重采样至1 m空间分辨率；② 5 m分辨率的ALOS全球数字地表模型数据：在开展大范围的滑坡参数提取和分析时，购买和使用日本遥感技术中心ALOS卫星的AW3D高分辨率地形产品，空间分辨率约为5 m。

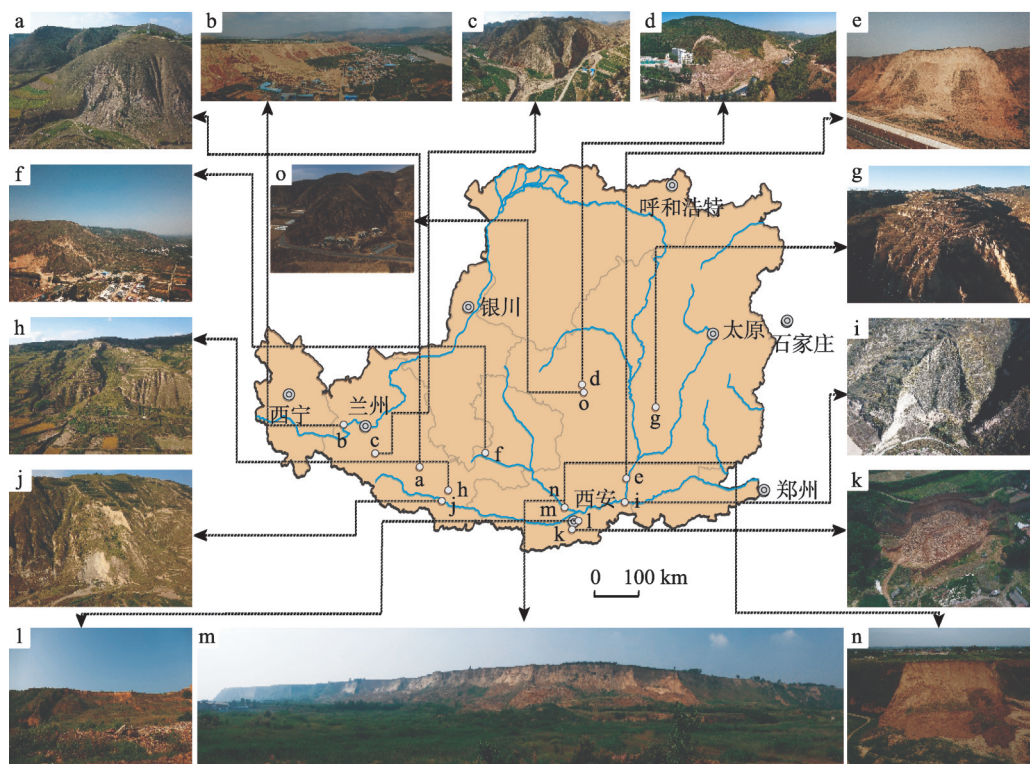


图2 黄土高原典型黄土滑坡位置与图像

Fig. 2 Locations and photos of typical loess landslides in Loess Plateau

表1 黄土高原滑坡调查与解译数据来源

Tab. 1 Data sources of landslides investigation and interpretation in Loess Plateau

数据源	数据形式	数据来源	覆盖范围	DSM分辨率	数据开放性
无人机野外调查	DSM、DOM、 滑坡编目	本课题组(http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=1508)	黄土高原 局部	1 m	公开
AW3D 5m-DSM	DSM	日本遥感技术中心(https://www.aw3d.jp/en/)	全球	5 m	部分公开(5 m 分辨率需付费)

基于以上2种数据源，构建了基于高分辨率影像和地形解译的黄土高原滑坡数据库^[29]，该数据库已在“全球变化科学研究数据出版系统”正式上线（<http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=1508>）。

3.2 无人机摄影测量和遥感解译

2017年3月以来，研究团队在黄土高原六大线路持续开展了黄土滑坡无人机野外调查工作（图3）：（I）西安—宝鸡—天水—秦安—定西—兰州—黑方台—西宁；（II）西安—咸阳—平凉—会宁—定西；（III）西安—白鹿塬—蓝田—泾阳；（IV）西安—铜川—延安—志丹—榆林—鄂尔多斯；（V）西安—渭南—合阳；（VI）西安—渭南—三门峡—运城—离石—临汾。本文使用的无人机型号主要有大疆 DJI Mavic Pro、Phantom 4、Phantom 4 RTK 等。通过野外选点、相控点布设、航线规划、摄影测量作业、SfM 运动恢复重建、无人机影像建模、产品生成等环节，最终生成高分辨率（厘米级）的滑坡数字正射影像图（Digital Orthophoto Map, DOM）和数字表面模型（Digital Surface Model, DSM）。对于大范围的滑坡调查，本文首先利用谷歌卫星影像目视解译圈定滑坡边界，然后利用ALOS AW3D 5m-DSM地形数据进行滑坡数字地形分析和特征参数提取。

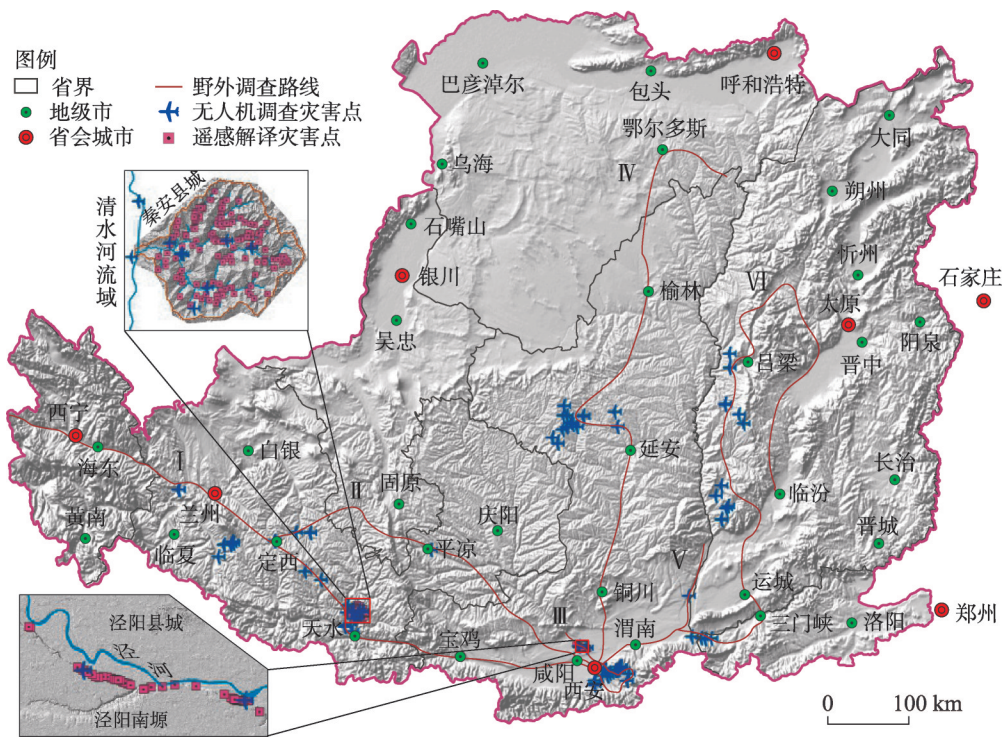


图3 黄土高原滑坡无人机野外调查点和遥感解译点

Fig. 3 UAV field survey and remote sensing interpretation sites of loess landslides in Loess Plateau

3.3 研究思路与黄土滑坡编目

本文研究技术路线图如图4所示。本文利用谷歌卫星影像和ALOS AW3D DSM数据完成了典型流域和典型地形区的黄土滑坡目视解译；开展无人机野外调查，获取了黄土滑坡野外照片，通过无人机数据预处理，生成了高分辨率的滑坡影像和地形数据，并进行了滑坡目视解译；基于以上高分辨率滑坡地形数据，利用GIS数字地形分析提取了这些滑坡的特征参数，构建了高分辨率黄土滑坡数据库；最后利用数理统计与分析方法，

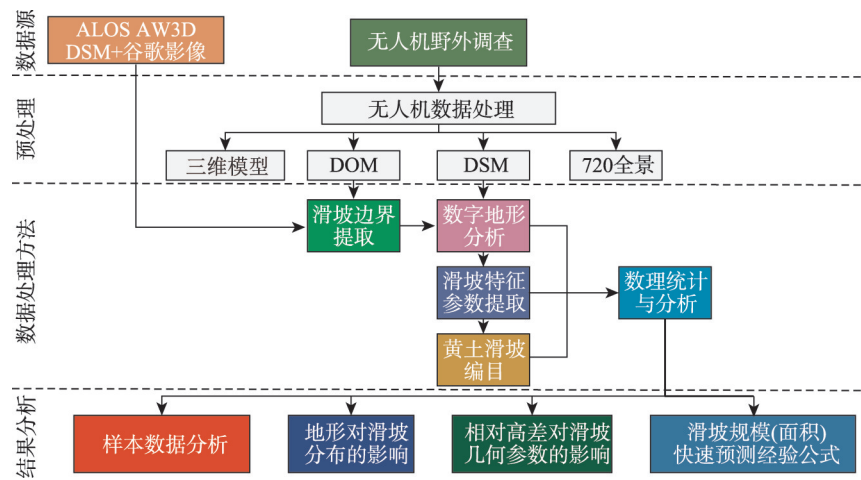


图4 研究技术路线图

Fig. 4 Technical roadmap for this study

分析了样本数据分布规律,探究了地形对黄土滑坡分布的影响,揭示了地形相对高差对滑坡几何参数的影响,建立了基于传统经验公式拟合的滑坡规模(面积)快速估算公式。

本文构建了基于高分辨率影像和地形解译的黄土高原滑坡数据库(<http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=1508>),具体解译和特征参数提取方法可参考研究团队相关研究成果^[16, 26]。该数据库包含了307个黄土滑坡的基本属性。其中235个黄土滑坡分布在黄土丘陵区,72个黄土滑坡分布在黄土台塬区。无人机调查的滑坡数量为108个,遥感解译的滑坡数量为199个。与传统地质灾害数据库相比,本文构建的黄土高原滑坡数据库数据源具有高分辨率和高精度的优势,典型黄土滑坡特征参数解译如图5所示。

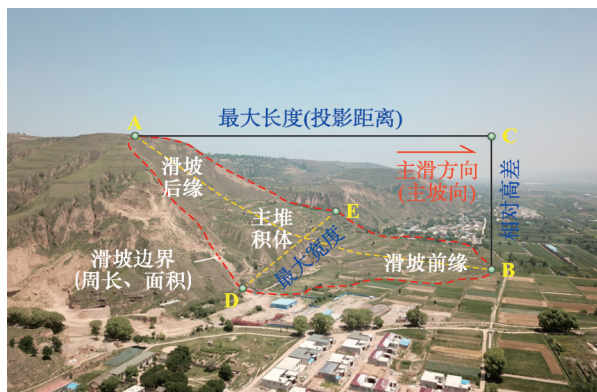


图5 典型黄土滑坡特征参数解译示意图

Fig. 5 Schematic diagram of typical loess landslide's characteristic parameters interpretation

4 结果分析

4.1 样本数据分析

本文通过无人机野外调查和遥感目视解译共获取了307个高分辨率黄土滑坡编目数据。利用数字地形分析和数理统计分析,绘制了不同规模尺度的黄土滑坡数量分布和累积频率曲线(图6)。从图6中可以看出,不同最大长度、最大宽度和周长统计下,黄土滑坡数量分布和累积频率曲线较为相似,且数量分布均呈现正偏态分布的特征;而不同滑坡面积下的滑坡数量随着滑坡面积的增加大致呈现几何级的下降趋势。在307个滑坡样本数据中,最大长度在400 m以下的滑坡数量占样本总数的77.85%,最大长度在100~200 m的滑坡数量最多(85个)(图6a);最大宽度在400 m以下的滑坡数量占样本总数的86.97%,最大宽度在100~200 m的滑坡数量最多(95个)(图6b);周长在800 m以下的滑坡数量占样本总数的63.52%,周长在400~600 m的滑坡数量最多(57个)(图6c);面积在3万m²以下的滑坡数量占样本总数的60.91%,面积在1万m²以下的滑坡数量最多(110个)(图6d)。

4.2 地形对黄土滑坡分布的影响

地形作为最基本的地理要素,其差异决定了地表自然景观的差异及地表物质(能量)的再分配。地形因子是对地形的量化表达,它描述了地形特征的基本参数^[30]。然而,根据不同分类原则和标准,种类繁多的地形因子可划入不同的分类体系^[30],高程、高差、高程分布曲线、距离、面积与表面积、体积、地形粗糙度、坡度与坡向、地形曲率、汇水面积与单位汇水面积等被认为是地形曲面的基本参数^[31]。黄土滑坡是一种重力地貌,其发育和分布无疑受到地形的控制作用。本文选取了4个与滑坡密切相关的地形因子进行分析,主要基于以下考虑:① 相对高差反映了滑坡的重力势能,是滑坡发育的必要内部条件之一,对斜坡的发育有着重要的影响^[32];② 坡度显著影响着岩土应力分布,对滑坡发育具有重要作用;③ 坡向通过影响太阳辐射和水汽分布,造成差异化风化与侵蚀,进而影响滑坡发育^[33];④ 坡形反映了滑坡的有效临空面,是形成滑坡的重要条件,适度的坡形产生滑坡的几率更高^[34]。

4.2.1 相对高差与滑坡分布 图7a表明相对高差与滑坡数量的分布曲线呈正偏态分布,

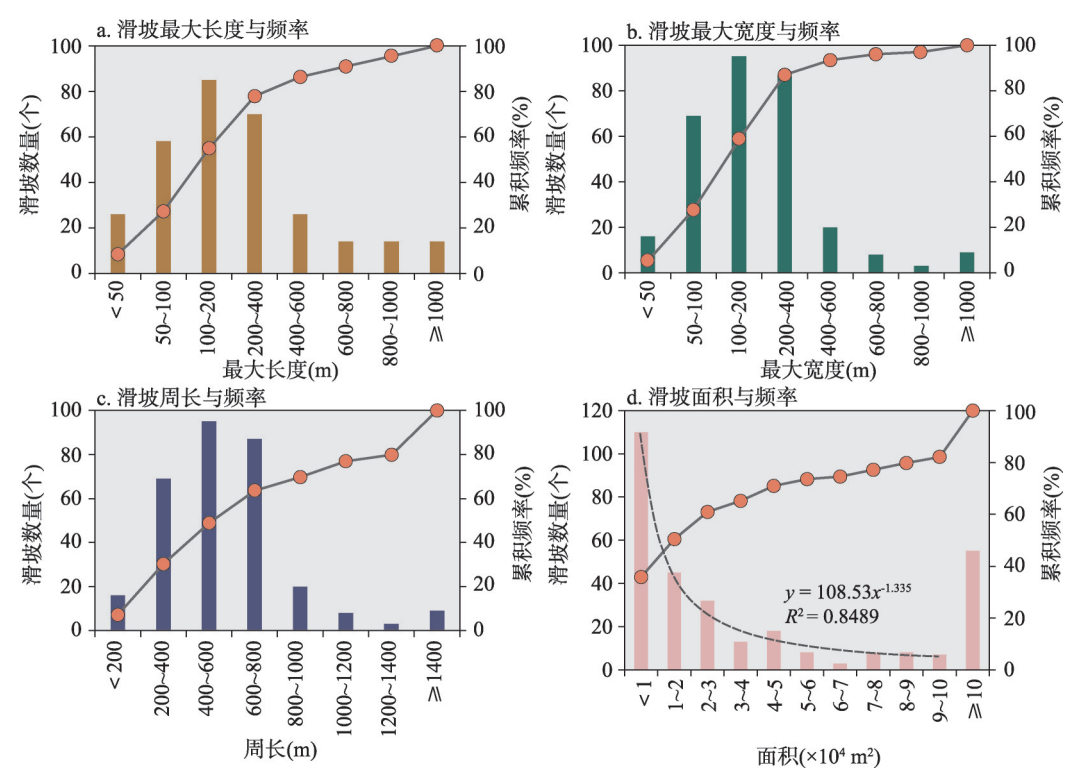


图6 黄土滑坡样本数据统计分析
Fig. 6 Statistical analysis of loess landslides sample data

黄土滑坡集中发育在相对高差为20~40 m、40~60 m、60~80 m、80~100 m、100~120 m、120~140 m区间内,该部分黄土滑坡数量约占样本数量的76.55%,其中相对高差60~80 m的区域滑坡发育数量最多,其次是相对高差为40~60 m区间,当相对高差大于220 m时,滑坡发育数量最少。

4.2.2 平均坡度与滑坡分布 图7b表明平均坡度与滑坡数量的分布曲线呈正态分布,黄土滑坡集中发育在平均坡度为15°~20°、20°~25°、25°~30°、30°~35°、35°~40°区间内,该部分黄土滑坡数量约占样本数量的84.04%,其中平均坡度20°~25°的区域滑坡发育数量最多,其次是平均坡度为25°~30°区间,平均坡度小于10°的区域最少。

4.2.3 坡形与滑坡分布 图7c表明黄土滑坡的坡形大致可分为凸形、凹形、凸凹形、凹凸形、直线形和复合型6大类。坡形形态为凹形、凹凸形和复合型的区域滑坡发育最为集中,约占样本数量的77.85%。凹形地形滑坡发育数量(86个)和比例(28.01%)最多,凸形地形滑坡发育数量(4个)和比例最少(1.3%)。

4.2.4 主坡向与滑坡分布 图7d表明,按照方位划分,可分滑坡主坡向为北偏东((0°, 45°])、东偏北((45°, 90°))、东偏南((90°, 135°])、南偏东((135°, 180°))、南偏西((180°, 225°])、西偏南((225°, 270°))、西偏北((270°, 315°])、北偏西((315°, 360°))、正北(0°和360°)、正东(90°)、正南(180°)、正西(270°)。样本数据统计表明,除北偏东方位滑坡发育数量和比例最多,其他方位滑坡发育数量和比例差别不大。

4.3 相对高差对滑坡几何参数的影响

滑坡作为一种典型的重力侵蚀地貌,地形的相对高差决定了滑坡运动动力势能。在某种程度上,地形的相对高差也就决定了滑坡的最长运动距离和滑坡的规模(周长、面

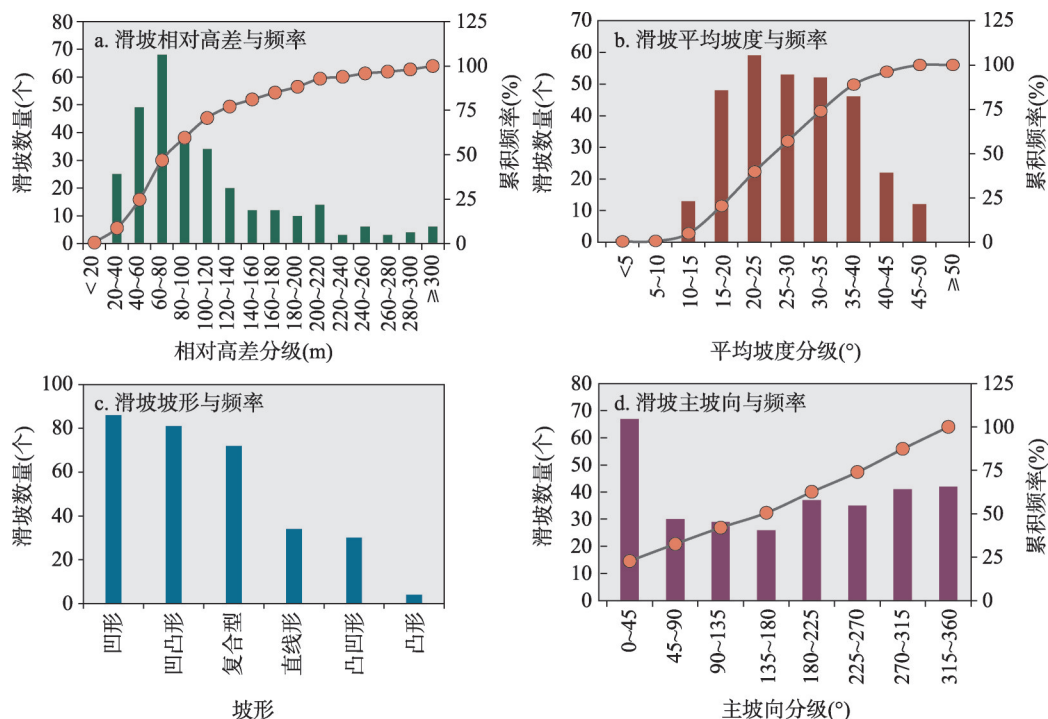


图7 不同地形因子下的黄土滑坡发育情况

Fig. 7 Loess landslides development under different topographic factors

积等)。因此,总结归纳相对高差与滑坡的最长运动距离和滑坡的规模(周长、面积等)之间相互关系,对地质灾害预测和评估具有重要意义。本文基于高分辨的黄土滑坡样本数据统计分析,分别拟合了黄土高原全区、黄土丘陵山区和黄土台塬区的地形相对高差与滑坡的最长滑距、周长和面积的关系,建立其与相对高差之间的数学关系式(图8)。

由图8可知,地形相对高差与滑坡最长滑动距离、周长、面积在黄土丘陵区拟合效果最好($R^2 > 0.80$),在黄土高原全区拟合效果次之($0.70 < R^2 < 0.80$),在黄土台塬区拟合效果最差($0.20 < R^2 < 0.35$)。

4.4 黄土高原滑坡规模(面积)快速预测

在地质灾害调查中,滑坡面积是评估滑坡规模的重要指标之一。然而,在传统野外调查中,准确获取滑坡面积是一项复杂且富有挑战性的工作。能否基于高分辨率影像和地形解译的黄土高原滑坡数据库建立黄土滑坡面积预测的经验公式呢?因此,本文尝试在黄土高原全区、黄土丘陵山区和黄土台塬区建立滑坡最大长度、最大宽度与滑坡面积之间的数据关系模型(图9),以为黄土滑坡规模(面积)调查提供经验公式支撑。

由图9可知,滑坡最大长度、最大宽度与面积拟合效果在黄土丘陵区拟合效果最好($R^2 > 0.80$),在黄土高原全区拟合效果次之($0.80 < R^2 < 0.90$),在黄土台塬区拟合效果最差($0.70 < R^2 < 0.80$)。且随着滑坡最大长度、最大宽度的增加,样本数据距拟合曲线的离散程度也随之增加,如当黄土丘陵区滑坡最大长度大于1000 m时,样本数据离散度增大;当黄土高原全区滑坡最大长度大于1000 m时,样本数据离散度也增大;当黄土台塬区滑坡最大长度和最大宽度大于200 m时,样本数据离散度均增大。但总体而言,滑坡最大长度、最大宽度与面积拟合效果较好,只不过当滑坡长、宽达到一定规模时,其面积拟合的准确度受到一定的影响。

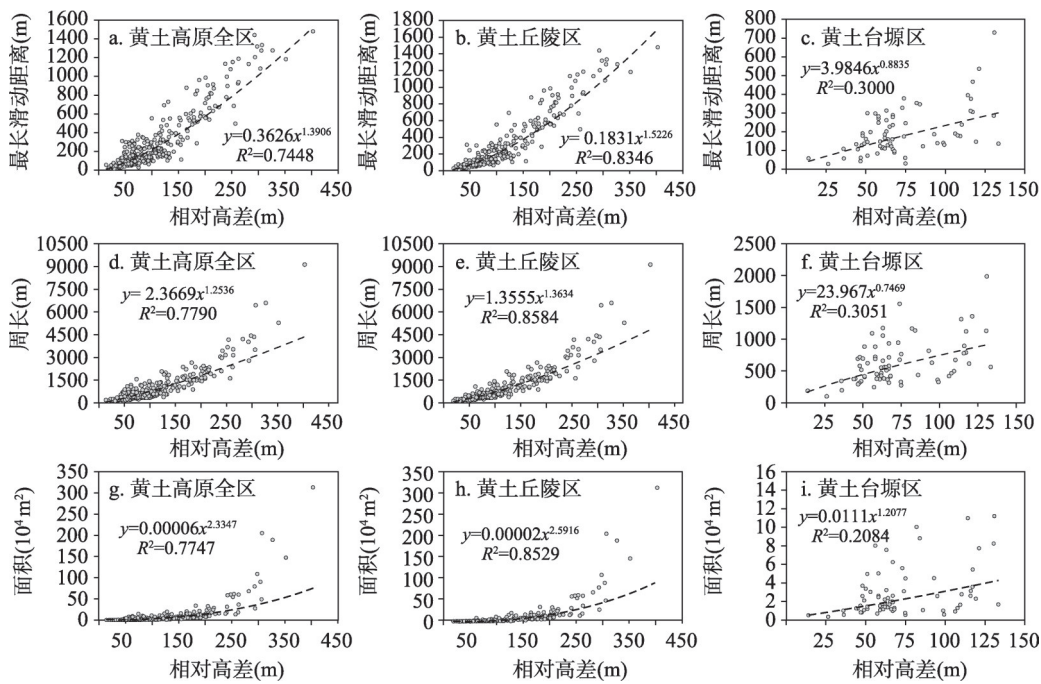


图8 相对高差与最长滑动距离、滑坡周长、滑坡面积的拟合关系

Fig. 8 Fitting relation between the relative height difference and the longest sliding distance, the perimeter, the area of landslides

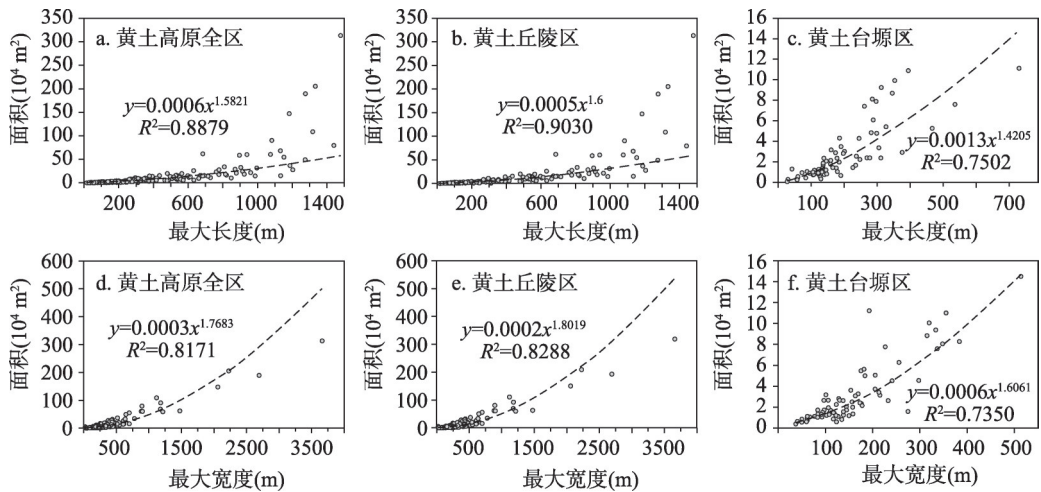


图9 滑坡最大长度、最大宽度与面积的拟合关系

Fig. 9 Fitting relation between the maximum length/width and the area of landslides

5 结论与讨论

5.1 讨论

与传统地形数据相比, 高分辨率地形有助于地形地貌特征的精细化表达, 为更好地从地形特征方面理解地表过程提供了机遇^[1]。本文利用高分辨率地形数据, 进行了黄土

高原滑坡特征参数提取与数字地形分析,探讨了地形对滑坡分布的影响,拟合了相对高差与滑坡特征参数的关系,建立了滑坡面积快速预测的经验公式。虽然取得了一些新认识,但研究仍然存在诸多不足之处:① 尽管本文在黄土高原开展了多年的无人机野外调查和遥感解译工作,但目前积累的高分辨率滑坡样本数据仍然偏少(仅307个),样本数据代表性也有待提高;② 地形因子是地形的定量化表达,用于描述地形曲面的因子多达几十种之多。本文选择了简单易得且对滑坡有重要影响的4个地形因子进行了分析,今后需加强其他地形因子对滑坡的影响研究,并揭示其规律;③ 数字地形分析的理论与方法日渐成熟,但本文只进行了浅显的分析和应用。今后应加强利用数字地形分析开展黄土滑坡形态学分析、信息图谱分析、水文分析、滑坡与地貌演化模拟等研究工作;④ 虽然本文获取了高分辨率的滑坡数据,也建立了高分辨率滑坡数据库,但在数据挖掘与分析方面仍有较大的提升空间。

在自然界,幂律分布规律似乎是一种很常见的现象,相关统计表明滑坡^[35-36]、喀斯特天坑^[37]、黄土洞穴^[27]、地震^[38]、火山喷发^[39]等灾害均符合幂律分布。本团队邱海军等^[40-42]对国土部门黄土地质灾害编目数据进行统计分析,发现地质灾害的规模参数存在幂律相依性,黄土高原滑坡、崩塌灾害其规模与频率(概率)很好地服从幂律分布规律,且已经意识到随着滑坡规模的增加,其频率分布曲线在双对数坐标下会出现“偏转效应”。在此基础上,本文利用高分辨率滑坡数据再一次进行了统计分析,得出黄土高原的滑坡灾害其特征参数之间、特征参数与地形因子之间也很好地符合幂律规律,并建立了黄土高原全区、黄土丘陵区 and 黄土台塬区各自的幂律公式,提出了基于统计学的滑坡面积快速预测公式。这些拟合公式建立,为快速评估滑坡规模或灾情提供了经验公式支撑。

影响滑坡发育的因素众多,然而地形因素无疑起着重要的控制作用。地形高程、地形坡度和地形高差被认为是地形控制滑坡的3个主要因素^[43],而滑坡规模与山坡起伏度之间也存在正相关关系^[44],高陡的山地斜坡对滑坡、土体蠕动和侵蚀过程极为敏感^[45]。然而,目前来看,有关地形对滑坡的影响研究大多是宏观层面的分析,今后需借助无人机、InSAR、原位监测、地下物理探测、土力学试验与数值模拟等技术手段与方法,开展地理学、地貌学、测量学、工程地质、水文地质等多学科交叉研究,才能更好地揭示地形影响黄土滑坡的内在作用机理。另外,由于滑坡发生机理、运动过程和堆积形态的复杂性,事实上很难准确估算出滑坡的方量。今后亟待需要进行多学科交叉开展滑坡调查,获取足够多的样本数据,探讨关键地形参数与滑坡体积方量之间的关系,这对于滑坡地质灾害应急救援具有重大参考价值。

5.2 结论

(1) 不同规模等级(如不同最大长度、不同最大宽度、不同周长和不同面积)的滑坡数量分布具有明显的规律性。不同最大长度、最大宽度和周长的黄土滑坡数量分布均呈现正偏态分布规律,而不同面积的滑坡数量分布则呈现明显递减的幂函数分布规律。

(2) 地形对黄土滑坡发育具有控制作用。相对高差与滑坡数量分布曲线呈正偏态分布,相对高差60~80 m的区域滑坡发育数量最多,相对高差大于220 m的区域滑坡发育数量最少;平均坡度与滑坡数量的分布曲线呈正态分布,平均坡度20°~25°的区域滑坡发育数量最多,25°~30°区域次之,小于10°区域最少;不同坡形对黄土滑坡发育也有较大影响,凹形、凹凸形和复合型的区域滑坡发育最为集中;不同的主坡向对滑坡发育的影响不太明显,北偏东方位滑坡发育数量和比例最多。

(3) 地形相对高差反映了滑坡重力势能的大小,通过相对高差与最长滑距、滑坡周长和滑坡面积的拟合发现,相对高差与它们呈现良好的幂函数关系。此外,滑坡最大长

度、最大宽度与滑坡面积也能用幂函数公式进行拟合。然而总体来看, 这些拟合公式在不同地形区的拟合效果有所差异, 黄土丘陵区拟合效果最好, 黄土高原全区次之, 黄土台塬区最差。这些拟合公式的建立, 为利用单一的指标快速预测和评估滑坡的运动距离和规模(面积)提供了经验公式支撑。

参考文献(References)

- [1] Peng Jianbing, Wang Qiyao, Men Yuming, et al. *Landslide Hazard of Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 2019. [彭建兵, 王启耀, 门玉明, 等. 黄土高原滑坡灾害. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [2] Wang Yongyan. *Loess and Quaternary Geology*. Xi'an: Shaanxi People's Publishing House, 1982. [王永焱. 黄土与第四纪地质. 西安: 陕西人民出版社, 1982.]
- [3] Liu T S. *Loess and the Environment*. Beijing: China Ocean Press, 1985.
- [4] Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. *Soil Erosion Control and Ecological Security in China (Volume of Northwest Loess Plateau)*. Beijing: Science Press, 2010. [水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全(西北黄土高原区卷). 北京: 科学出版社, 2010.]
- [5] Qiu H J, Regmi A D, Cui P, et al. Size distribution of loess slides in relation to local slope height within different slope morphologies. *CATENA*, 2016, 145: 155-163.
- [6] Zhuang J Q, Peng J B, Wang G H, et al. Distribution and characteristics of landslide in Loess Plateau: A case study in Shaanxi province. *Engineering Geology*, 2018, 236: 89-96.
- [7] Peng J B, Wang S K, Wang Q Y, et al. Distribution and genetic types of loess landslides in China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 170: 329-350.
- [8] Zhang Maosheng, Li Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(4): 530-540. [张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530-540.]
- [9] Zhuang J Q, Peng J B. A coupled slope cutting-a prolonged rainfall-induced loess landslide: A 17 October 2011 case study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014, 73(4): 997-1011.
- [10] Cui Y F, Nouri A, Chan D, et al. A new approach to DEM simulation of sand production. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 147: 56-67.
- [11] Tarolli P. High- resolution topography for understanding earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology*, 2014, 216: 295-312.
- [12] Niethammer U, James M R, Rothmund S, et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology*, 2012, 128: 2-11.
- [13] Casagli N, Cigna F, Bianchini S, et al. Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote sensing: Examples from the EC-FP7 project SAFER. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2016, 4: 92-108.
- [14] Shafique M, Meijde M V D, Khan M A. A review of the 2005 Kashmir earthquake-induced landslides: From a remote sensing prospective. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 118: 68-80.
- [15] Dąbski M, Zmarz A, Pabjanek P, et al. UAV-based detection and spatial analyses of periglacial landforms on Demay Point (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica). *Geomorphology*, 2017, 290: 29-38.
- [16] Hu Sheng, Qiu Haijun, Wang Xingang, et al. Extracting characteristic parameters of loess landslides based on high-resolution topography and its application prospect. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(2): 367-379. [胡胜, 邱海军, 王新刚, 等. 基于高分辨地形的黄土滑坡特征参数提取及其应用意义. 第四纪研究, 2018, 38(2): 367-379.]
- [17] Bayer B, Simoni A, Schmidt D, et al. Using advanced InSAR techniques to monitor landslide deformations induced by tunneling in the Northern Apennines, Italy. *Engineering Geology*, 2017, 226: 20-32.
- [18] Liu P, Li Z H, Hoey T, et al. Using advanced InSAR time series techniques to monitor landslide movements in Badong of the Three Gorges region, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 253-264.
- [19] Wang C, Zhang H, Wu F, et al. Disaster phenomena of Wenchuan earthquake in high resolution airborne synthetic aperture radar images. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2009, 3(1): 031690. DOI: 10.1117/1.3154558.
- [20] Razak K A, Santangelo M, van Westen C J, et al. Generating an optimal DTM from airborne laser scanning data for landslide mapping in a tropical forest environment. *Geomorphology*, 2013, 190: 112-125.
- [21] Tang Guoan, Na Jiaming Cheng Weiming. Progress of digital terrain analysis on regional geomorphology in China. *Acta*

- Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1570-1591. [汤国安, 那嘉明, 程维明. 我国区域地貌数字地形分析研究进展. 测绘学报, 2017, 46(10): 1570-1591.]
- [22] Hu Sheng. Spatial pattern of landslide in Loess Plateau and its influence on geomorphologic evolution [D]. Xi'an: Northwest University, 2019. [胡胜. 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, 2019.]
- [23] Selby M J. Hillslope Materials and Processes. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [24] Crozier M J. Landslide geomorphology: An argument for recognition, with examples from New Zealand. Geomorphology, 2010, 120(1-2): 3-15.
- [25] Migoń P, Jancewicz K, Różycka M, et al. Large-scale slope remodelling by landslides: Geomorphic diversity and geological controls, Kamienne Mts., Central Europe. Geomorphology, 2017, 289: 134-151.
- [26] Hu S, Qiu H J, Wang X G, et al. Acquiring high-resolution topography and performing spatial analysis of loess landslides by using low-cost UAVs. Landslides, 2018, 15(3): 593-612.
- [27] Hu S, Qiu H J, Wang N L, et al. The influence of loess cave development upon landslides and geomorphologic evolution: A case study from the northwest Loess Plateau, China. Geomorphology, 2020, 359: 107167. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107167.
- [28] Lei Xiangyi. The Cause of Formation, Prevention and Therapy of Geological Disasters of Loess. Beijing: Peking University Press, 2014. [雷祥义. 黄土地质灾害的形成机理与防治对策. 北京: 北京大学出版社, 2014.]
- [29] Hu Sheng, Qiu Haijun, Wang Ninglian, et al. High-resolution image based landslides dataset in Loess Plateau. Global Change Data Repository, 2020. DOI: 10.3974/geodb.2020.04.08.V1. [胡胜, 邱海军, 王宁练, 等. 基于高分辨率影像和地形解译的黄土高原滑坡数据库. 全球变化数据仓储, 2020. DOI: 10.3974/geodb.2020.04.08.V1.]
- [30] Tang Guoan, Li Fayuan, Yang Xin, et al. Exploration and Practice of Digital Terrain Analysis of Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2015. [汤国安, 李发源, 杨昕, 等. 黄土高原数字地形分析探索与实践. 北京: 科学出版社, 2015.]
- [31] Zhou Qiming, Liu Xuejun. Digital Terrain Analysis. Beijing: Science Press, 2006. [周启鸣, 刘学军. 数字地形分析. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [32] Qiao Jianping, Wu Caiyan. The influence of relative elevation on landslide occurrence within Yunyang-Wushan section in the Three Gorges Reservoir region. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(4): 16-19. [乔建平, 吴彩燕. 三峡水库区云阳—巫山段斜坡高差因素对滑坡发育的贡献率研究. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4): 16-19.]
- [33] Xiong Haixian, Huang Guangqing, Gong Qinghua, et al. A review on application of digital terrain analysis in landslide researches. Tropical Geography, 2015, 35(1): 139-146. [熊海仙, 黄光庆, 宫清华, 等. 数字地形分析在滑坡研究中的应用综述. 热带地理, 2015, 35(1): 139-146.]
- [34] Qiao Jianping. Structure and shape of landslide. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1355-1358. [乔建平. 滑坡体结构与坡形. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1355-1358.]
- [35] Malamud B D. Tails of natural hazards. Physics World, 2004, 17(8): 25-29.
- [36] Qiu H J, Cui Y F, Hu S, et al. Size distribution and size of loess slides in response to slope height and slope gradient based on field survey data. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 1443-1458.
- [37] Gutiérrez F, Fabregat I, Roqué C, et al. Sinkholes and caves related to evaporite dissolution in a stratigraphically and structurally complex setting, Fluvia Valley, eastern Spanish Pyrenees: Geological, geomorphological and environmental implications. Geomorphology, 2016, 267: 76-97.
- [38] Kagan Y Y. Earthquake size distribution: Power-law with exponent $\beta=1/2$? Tectonophysics, 2010, 490(1/2): 103-114.
- [39] Nishimura T, Iguchi M, Hendrasto M, et al. Magnitude-frequency distribution of volcanic explosion earthquakes. Earth Planets and Space, 2016, 68(1): 125. DOI: 10.1186/s40623-016-0505-2.
- [40] Qiu Haijun, Cui Peng, Hu Sheng, et al. Size-frequency distribution of landslides in different landforms on the Loess Plateau of northern Shaanxi. Earth Science, 2016, 41(2): 343-350. [邱海军, 崔鹏, 胡胜, 等. 陕北黄土高原不同地貌类型区黄土滑坡频率分布. 地球科学, 2016, 41(2): 343-350.]
- [41] Qiu Haijun, Cui Peng, Cao Mingming, et al. Distribution of frequency-size of geological disaster base on principle of maximum entropy in Loess Plateau. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3541-3549, 3555. [邱海军, 崔鹏, 曹明明, 等. 基于最大熵原理的黄土丘陵区地质灾害规模频率分布研究. 岩土力学, 2014, 35(12): 3541-3549, 3555.]
- [42] Qiu Haijun, Cao Mingming, Wang Yanlin, et al. Power law correlations of geohazards in loess hilly region. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(1): 107-113. [邱海军, 曹明明, 王雁林, 等. 黄土丘陵区地质灾害规模参数幂律相依性研究. 地理科学, 2015, 35(1): 107-113.]
- [43] Xiao Yang. Analysis of relationship of topography and topographic evolution with landslides based on GIS [D].

- Changsha: Central South University, 2014. [肖阳. 基于 GIS 的滑坡与地形及其演化关系的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.]
- [44] Medwedeff W G, Clark M K, Zekkos D, et al. Characteristic landslide distributions: An investigation of landscape controls on landslide size. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 539: 116203. DOI: 10.1016/j.epsl.2020.116203.
- [45] Regmi N R, Walter J I. Detailed mapping of shallow landslides in Eastern Oklahoma and Western Arkansas and potential triggering by Oklahoma earthquakes. *Geomorphology*, 2020, 366: 106806. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.05.026.

The influence of terrain on loess landslides in Loess Plateau

HU Sheng^{1,2,3}, QIU Haijun^{1,2,3}, WANG Ninglian^{1,2,3}, CUI Yifei⁴,
CAO Mingming¹, WANG Jiading^{3,5}, WANG Xingang^{3,5}

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China; 3. Institute of Earth Surface System and Hazards, Northwest University, Xi'an 710127, China; 4. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: The lack of high-resolution terrain and image data has become a major bottleneck for geoscientists to study surface phenomena, features and processes. In recent years, the development of low-cost UAV equipment and photogrammetric technology makes it possible to obtain high-resolution data in the field of geoscience, which has greatly improved the accuracy and efficiency of geological disaster field survey and disaster cataloging. In this study, a database including 307 loess landslides was constructed through field investigation of UAV and remote sensing image interpretation. On this basis, through digital terrain analysis (DTA) and mathematical statistics, we summarize the distribution rule of loess landslides sample data, discuss the influence of terrain on the distribution of loess landslides is discussed, describe the influence of the relative height difference of terrain on the longest sliding distance, landslide perimeter, and landslide area, and propose formulas for quickly estimating landslide scale based on traditional empirical formula fitting. The results show that: (1) There are obvious regularities in the scale-frequency distribution of landslides. The frequency of loess landslides with different maximum lengths, maximum widths and perimeters shows a positive skew distribution, while the frequency distribution of landslides with different areas presents a power function pattern. (2) Terrain plays a significant role in controlling the development of loess landslides. The quantity of landslides on slope units with different height differences, average slopes, slope forms varies greatly. (3) The fitting curves of the relative height difference and the longest slipping distance, or landslide's perimeter, or landslide's area follow the power law distribution well. However, the fitting effects of different terrain areas are different. The loess hilly area has the best fitting effect, followed by the whole Loess Plateau, and the loess tableland area is the worst. (4) The rapid prediction models of loess landslide scale established in this study provide empirical formula support for landslide investigation.

Keywords: high resolution; terrain; loess landslides; Loess Plateau