

地形起伏度和坡度分析在区域滑坡灾害评价中的应用

郭芳芳¹ 杨 农² 孟 晖³ 张岳桥^{1,2} 叶宝莹⁴

(1. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
3. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 4. 中国地质大学土地科学技术系, 北京 100083)

摘要:基于 ArcGIS 平台, 利用 SRTM3-DEM 数据资料, 选择鄂尔多斯及其周缘为研究区, 计算并定量分析了地形起伏度和坡度, 并利用区域滑坡灾害调查资料, 初步建立了地形起伏度、坡度与滑坡灾害之间的相关性, 讨论了地形起伏度的区域地貌意义。结果表明, 研究区滑坡集中发育地区的地形起伏度为 200~300 m, 在此范围内滑坡占研究区所有滑坡总数的 48.5%, 此区间的面积占研究区总面积的 20.3%; 坡度为 10~18°, 此范围内滑坡占研究区所有滑坡总数的 46.7%, 而此区间的面积占研究区总面积的 30.5%。在地貌类型上, 滑坡集中发育地区对应残丘、黄土塬及黄土梁等。通过研究区横向、纵向剖面的地形特征分析, 表明地形起伏度和坡度分析是相互补充的, 它们均与区域滑坡发生和分布存在良好的相关性。这种相关性为区域滑坡灾害评价提供了新的思路, 对区域防灾规划和灾害区预测具有重要的应用意义。

关键词:地形起伏度; 坡度; 滑坡; DEM; GIS; 相关性

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)01-0131-13

1 引言

地形起伏度(Relief Amplitude)和坡度(slope)是地貌学中描述地貌形态的两个重要参数。地形起伏度, 也称为地势起伏度^[1-3], 反映地表起伏变化, 常用某一确定面积内最高点和最低点海拔高度之差来表示^[4], 也有一些学者用地表的实际面积与投影面积的比值来表示, 这种方法常用来计算地形粗糙度(roughness)。笔者采用某一确定面积内最高点和最低点海拔高度之差来表示地形起伏度。坡度一般指坡面的铅直高度和水平宽度比值的反正切值。在笔者中坡度不是指实测得到的值, 而是基于 DEM 数据利用 ArcGIS 提取的坡度值。

新近快速发展的地理信息系统(Geographic Information System, GIS)为地质学研究和地貌形态

的定量分析提供了新的视角和平台^[4-6]。数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)作为地理数据库中最为核心的空间信息资料和赖以进行地形分析的核心数据系统^[7], 不仅可以提取地形起伏度、坡度和坡向等地形参数^[8,9], 这些参数同时成为定量分析地形地貌和地质灾害评价的基础。在 20 世纪 90 年代, 国内对地形起伏度的研究主要集中在地貌制图方面, 如陈志明等^[2]编制《中国及其邻区 1:400 万地貌图》时, 借鉴 1:250 万欧洲国际地貌图^[10]的编制方法, 根据地形起伏度和海拔划分中国大陆地貌的基本形态类型。最近几年, 地形起伏度的研究广泛应用于地形分析方面^[11-13]。

另外, 地理信息系统在滑坡灾害评价中的应用日益成为地质灾害研究中的热点^[14-17]。众所周知, 滑

收稿日期: 2007-05-10; 改回日期: 2007-06-20

基金项目: 活动构造与区域地质环境调查成果集成与综合研究(1212010670104)与全国地质灾害易发区综合评价和区划项目(1212010640332)资助。

作者简介: 郭芳芳, 女, 1982 年生, 硕士生, 主要从事构造地貌与地理信息系统方面的研究; E-mail: bee3344@gmail.com。

通讯作者: 张岳桥, 男, 1963 年生, 教授, 主要从事新构造与构造地质的教学和研究工作; E-mail: yueqiao-zhang@sohu.com。

坡的发育受控于很多因素,如地形(相对高差)、地层岩性(易滑动地层)、地质构造(特殊构造部位、断层破碎带等)、河谷切割密度(区域内线性沟谷分布)等,这些主控因素成为地质灾害危险度区划的基础^[18]。然而,只有深入研究每一个主控因素与滑坡发育之间的关系,才能最终建立科学的滑坡灾害评价系统,提供客观的滑坡发生的区域空间预测模型。探询滑坡发生的地形因素对深入研究区域滑坡的发生和分布规律是有帮助的^[19-21]。在滑坡灾害的地形控制因素分析中,坡度和坡向受到了重视,尤其在单体滑坡的监测中,坡度和坡向可以通过野外实测得到,是控制单体滑坡发育的重要因素。但是,在滑坡区域空间预测研究中,坡度和坡向的提取基于 DEM 或者地形图,这种坡度已失去了原来地貌学意义^[22];而地形起伏度在区域性研究中更能够客观分析地形地貌。

笔者在 ArcGIS 软件平台上,利用 SRTM3-DEM 数据资料,选择鄂尔多斯及其周缘为研究区,通过对研究区地形起伏度和坡度的提取,结合现有区域滑坡灾害调查数据资料,建立这两个地形参数与区域滑坡发育之间的相关性,探讨地形起伏度和坡度分析在地质灾害评价中的应用。

2 研究区概况

研究区包括了鄂尔多斯及其周缘地区,地理坐标范围为 32°~40°N,105°~114°E,以陕西省为中心,涵盖了陕西省、山西省、宁夏回族自治区、河南省及内蒙古自治区部分地区,属于中国地貌单元的第二级阶梯带上。区内地貌类型多样,包括戈壁、沙漠、黄土高原、丘陵、山地、平原等。西部属于青藏高原东北缘,其中耸立着北北东向贺兰山(最高峰海拔 3556 m)和北北西向六盘山(最高峰海拔 2942 m);中部为著名的鄂尔多斯高原,由北部的毛乌素沙漠和南部的黄土高原组成,平均海拔在 1600~1500 m;东部为山西高原,其中近南北向吕梁山最高峰海拔 2831 m,太行山最高峰海拔 2059 m;南部横亘着中国南北气候分界——秦岭山脉。黄河中游的晋陕峡谷及汾河和渭河深切研究区中部地区。整个研究区自然地理条件复杂,普遍覆盖着深厚黄土,气候差异显著,年降水量 400~1200 mm,且分布极不均匀,加之不合理的人类活动等因素,滑坡灾害频发,造成人民生命财产的重大损失^[23]。

3 数据和方法

3.1 数据

笔者使用的数据资料包括 SRTM3-DEM 数据^[24]和研究区内滑坡灾害点数据。SRTM3-DEM 数据是由美国航空航天局(NASA)、德国航空航天中心(DLR)及意大利航天局(ASI)共同实施的航天飞机雷达地形测量任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)采集的,采用干涉雷达三维成像技术,数据的采集范围是南纬 57°到北纬 60°之间的区域,分辨率分为 3 弧秒,数据格式为二进制格式。数据水平方向误差为 10~20 m,垂直方向相对误差 ± 6 m,绝对误差 ± 16 m,这里相对误差是指 225 m \times 225 m 范围内数据的误差,绝对误差是指整个采集区域内数据的误差。经过与研究区内部分 1:5 万 DEM 数据的对比和分析,得出研究区 SRTM3-DEM 数据能够满足区域地形起伏度提取的精度要求的结论。

研究区内滑坡灾害数据由全国地质灾害易发区综合评价和区划项目提供,数据范围与研究区吻合,数据格式为 ArcGIS 的 shp 格式。该数据包括研究区内滑坡的位置、规模、人员伤亡情况等,属于历史调查记录数据,共有滑坡点 1631 个,其中巨型滑坡(>1000 万 m³)189 个,大型滑坡(100~1000 万 m³)125 个,中型滑坡(10~100 万 m³)957 个,小型滑坡(<10 万 m³)360 个。整个研究区发育的滑坡以中型滑坡为主,占滑坡总数的 58.6%。研究区滑坡分布见图 1。

3.2 方法与处理流程

所用软件平台是 ArcGIS 9.1,在计算地形起伏度和坡度前,首先对 SRTM3-DEM 数据进行预处理,即数据格式转换和投影变换。将二进制数据转换成 ArcGIS 栅格数据,投影方式采用 Albers 等积圆锥投影。在此基础上,利用 ArcGIS 平台提取地形起伏度和坡度,数据处理流程如图 2 所示。

3.3 地形起伏度的提取

地形起伏度的提取是在 ArcInfo 的 GRID 模块支持下,利用移动窗口分析法来实现的。移动窗口分析是栅格数据分析的一种基本方法,指对于栅格数据系统中的—个、多个栅格点或全部数据,开辟一个有固定分析半径的窗口(分析半径指矩形移动窗口的边长),并在该窗口内进行诸如极值、差值、均值等一系列统计计算,或与其他层面的信息进行必要的复合,从而实现栅格数据有效的水平方向扩展分析^[25]。

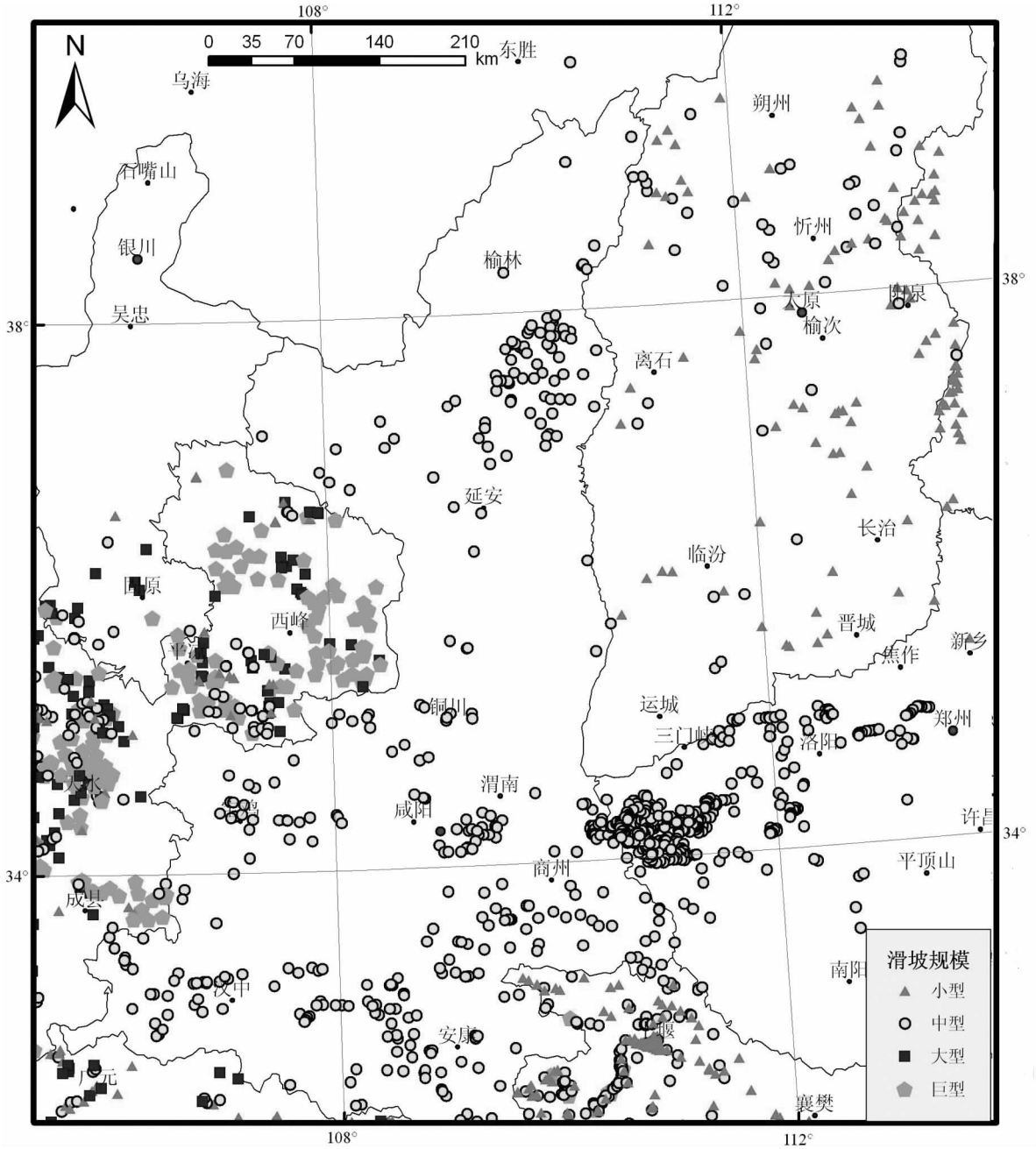


图 1 研究区滑坡分布

Fig.1 Distribution of landslides in the study area

地形起伏度的计算关键在于统计单元的选择,也就是定义所指的某一确定面积的值。随着统计单元半径的增大,地形起伏度的值也随之增大,但增到一定程度即趋于稳定。最佳的统计单元才能真实反映地形起伏。涂汉明等^[26]论证了全国地形起伏度的最佳统计单元是 21 km²,而唐飞等^[10]则通过对准噶尔盆地地形起伏度的研究,认为 21 km²的统计单元

只在全国范围的统计中有意义,具体到区域时,21 km²的统计单元计算的地形起伏度不够精细,很难准确地反映地形起伏的实际情况,4 km²才是准噶尔盆地地区的最佳统计单元。

对于本文的研究地区,不仅需要计算最适合本研究区的地形起伏度统计单元,而且需要找到能够反映地形起伏度和滑坡发育关系的最佳统计单元,即这个

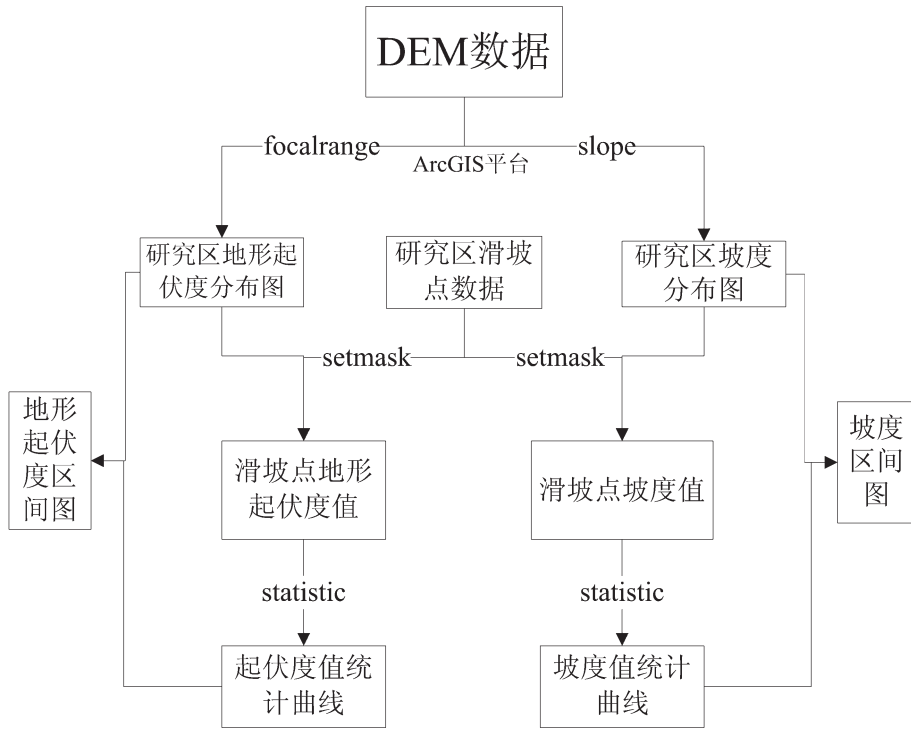


图 2 数据处理流程
Fig.2 Flow chart of data processing

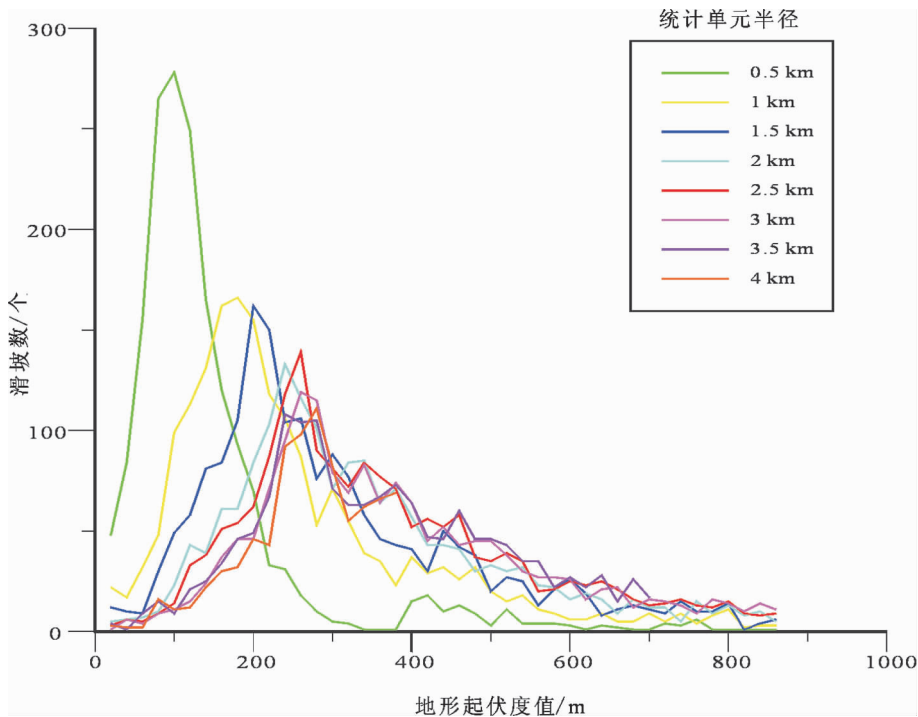


图 3 不同统计单元地形起伏度值-滑坡个数统计曲线
Fig.3 Statistical curve of the relief amplitude-landslide number in different moving windows

最佳统计单元不仅反映研究区地形地貌,而且反映滑坡点对应的真实地形起伏度。鉴于此,笔者分别求取了 0.5 km, 1 km, 1.5 km, 2 km, 2.5 km, 3 km, 3.5 km, 4 km 分析半径下研究区的地形起伏度分布, 利用 GRID 模块中 SETMASK 命令提取出研究区内每一个滑坡灾害点所对应的地形起伏度值, 并作出地形起伏度值/滑坡个数的统计曲线(图 3)。

计算结果显示, 无论分析半径大小, 统计曲线都会出现一个滑坡集中发育的峰值区间, 随着分析半径的增加, 统计曲线的峰值逐渐减小, 当减小到一定程度时, 曲线峰值趋于稳定。统计曲线峰值表示研究区内滑坡在此地形起伏度处发育最多。图 4 展示了不同统计单元地形起伏度值与滑坡个数统计曲线峰值的分布, 从图 4 可以看出, 曲线拐点出现在分析半径为 2 km 处, 拐点左侧曲线斜率逐渐增大, 拐点右侧曲线趋于平稳, 说明半径 2 km 统计单元反映真实的地形起伏。由此可以确定, 研究区地形起伏度最佳统计单元为 2 km×2 km, 即统计单元面积为 4 km²。

基于 SRTM3-DEM 数据, 开辟半径为 2 km 的移动分析窗口, 求取分析窗口内的高差, 作为目标栅格的起伏度, 并对全图栅格求取高差, 便得到了整个研究区地形起伏度的栅格图(图 5), 用公式表示如下:

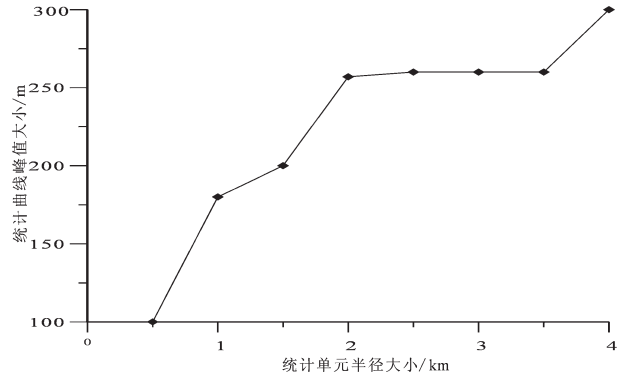


图 4 统计曲线峰值分布

Fig.4 Distribution of the highest points in the statistical curve of relief amplitudes

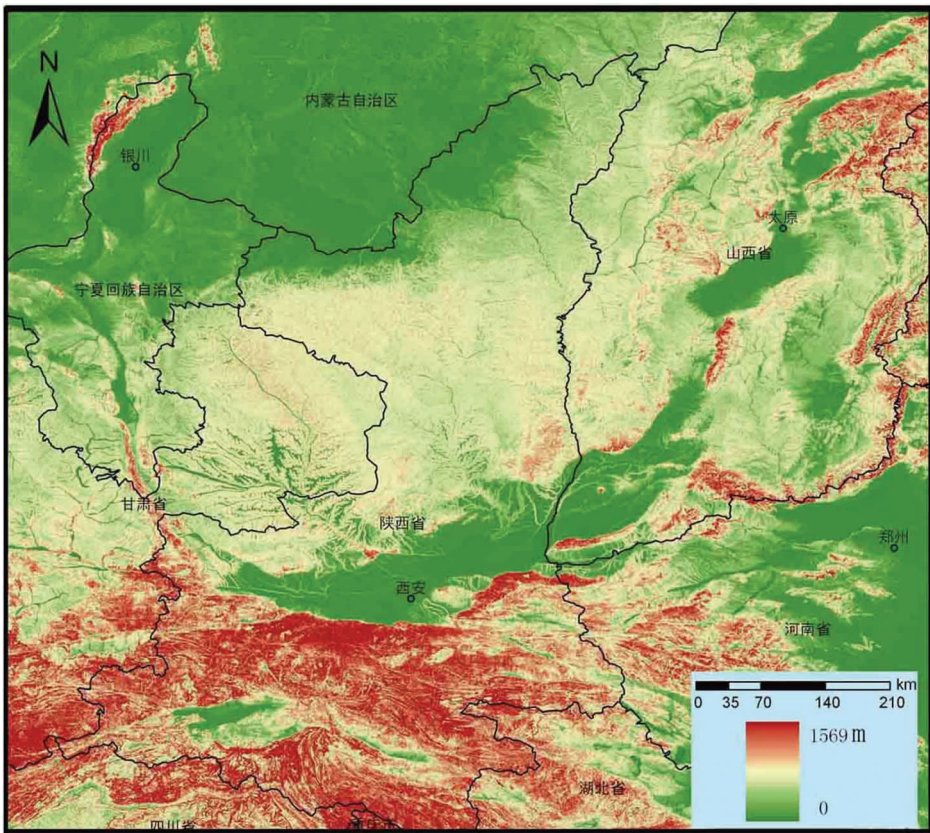


图 5 研究区地形起伏度分布图

Fig.5 Distribution of relief amplitudes in the study area

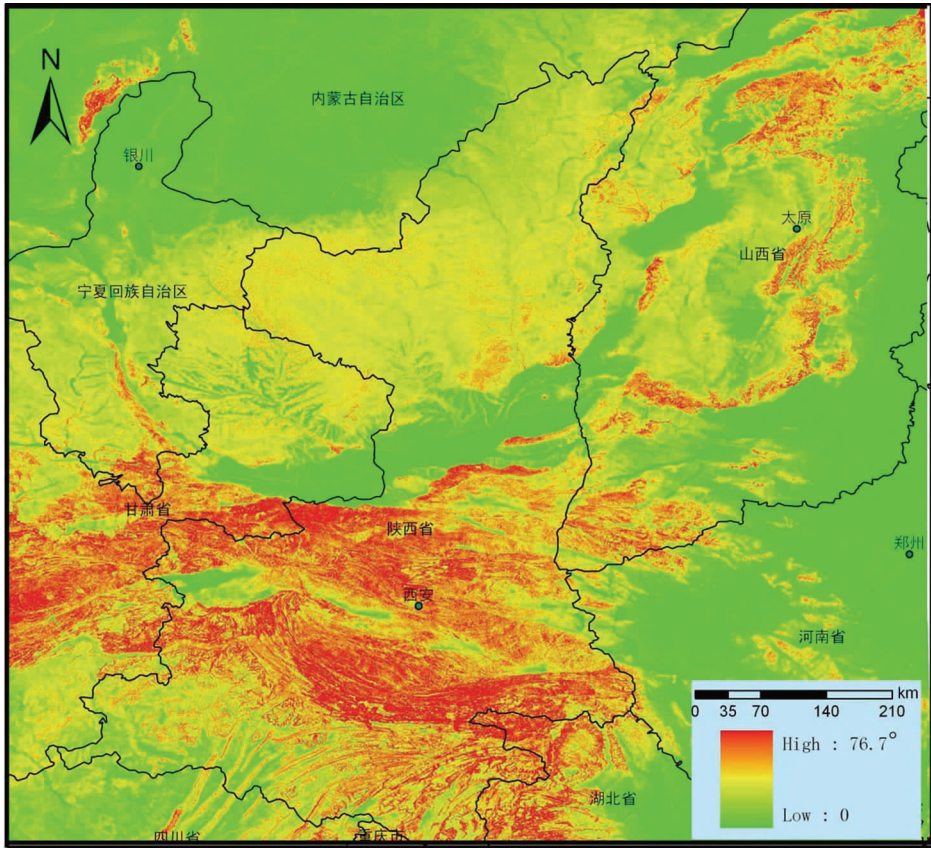


图 6 研究区坡度分布

Fig.6 Distribution of slopes in the study area

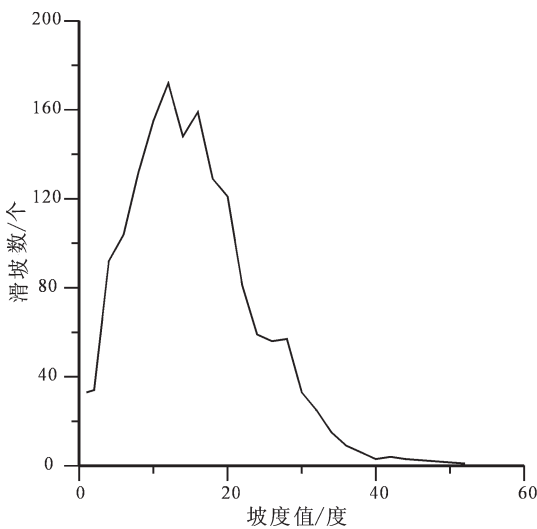


图 7 坡度统计曲线

Fig.7 Statistical curve of slopes

$$H = hijmax - hijmin \quad (i = 1,2,3,\dots,n; j = 1,2,3,\dots,n)$$

其中 H 代表地形起伏度, $hijmax$ 代表分析窗口内最大高程值, $hijmin$ 代表分析窗口内最小高程值。对于上述算法 GRID 模块提供了 FOCALRANGE 函数来实现。

3.4 坡度的提取

坡度的计算方法已十分成熟^[6], 本项研究基于 SRTM3-DEM 数据, 利用 GRID 模块中的 SLOPE 命令计算了研究区的坡度, 得到研究区坡度分布图 (图 6)。按照地形起伏度相同的处理流程, 得出研究区内坡度值/滑坡个数的统计曲线 (图 7)。

4 结果分析

4.1 地形起伏度

计算结果显示 (图 5), 整个研究区的地形起伏度分布在 0~1569 m, 平均起伏度为 244 m。据陈志明等^[7]在地貌制图时的分类标准, 研究区内平坦起伏 (0~20 m) 地区面积占总面积的 10.9%, 小起伏

(20~75 m)地区面积占总面积 15.5%,中起伏(75~300 m)地区面积占总面积的 44.1%,山地起伏(300~600 m)占总面积的 22.5%,高山起伏(600~1569 m)只占总面积的 7%。这些统计结果显示,研究区地形主要以中起伏为主,平坦起伏和高山起伏只占很少比例。

滑坡灾害点与地形起伏度相关分析表明(图 8),研究区内滑坡灾害发育的地形起伏度在 13~1133 m,此范围之外无滑坡记录。由于滑坡点数据是历史滑坡调查所得,在人类聚居的地方发生滑坡记录比较详细,而在极高山等人类活动稀少的地方发生的滑坡则极少记录,也就是“有灾无害”的滑坡可能不在统计范围内。根据已有滑坡资料的统计分析,从 0~100 m 共有滑坡点 48 个, 占所有滑坡点总数的 2.9%,从 100 m 开始,曲线斜率陡增,在 257 m 处达到峰值,然后曲线斜率陡降,降到 600 m 时,开始缓慢降低,在 800 m 处曲线出现小幅度回弹,然后直到趋于水平,600~1133 m 共有滑坡点 131 个, 占总

数的 8%。各区间在整个研究区占的面积比如图 9 所示。滑坡灾害集中发生地区的地形起伏度在 200~300 m,滑坡点占研究区滑坡总数的 48.5%,占研究区总面积的 20.3%。这个结果说明,在区域范围内地形起伏度和滑坡发育存在很好的相关性,这个结果对滑坡灾害空间预测具有重要的应用价值。

4.2 地形坡度

如图 7 所示,整个研究区的坡度分布在 0~76.7°,平均坡度值为 10.4°。从 4°开始,坡度值所对应的滑坡个数急剧增加及曲线斜率的增加。当坡度值达 12°时,对应的滑坡个数达到最大值,然后降低,并在 14°开始小幅度回弹,从 16°又开始下降。从坡度曲线形态看,滑坡集中发育区域的坡度在 10~18°。整个研究区内共有滑坡灾害点 1631 个,计算出坡度 10~18°的滑坡点 763 个,占滑坡总数的 46.7%, 10~18°区间面积占研究区总面积的 30.5%。

地形起伏度值/滑坡个数统计曲线(图 8)和坡度值/滑坡个数统计曲线(图 7)总体趋势相似,都存在一个区间对应着滑坡集中发育范围。地形起伏度和坡度相互印证,共同揭示区域滑坡分布规律。

5 讨论

根据上述统计结果,将研究区地形起伏度分为<200 m、200~300 m 和>300 m 3 个区间,根据这种分类方案得到研究区地形起伏度区间分布图(图 10)。

从图 10 可以看出,研究区 200~300 m 地形起伏度区间主要对应于黄土发育地区,指示滑坡主要与黄土发育有关^[28,29]。此区间位于鄂尔多斯盆地南部地区,深部构造比较稳定^[30],厚度几十米至几百米的黄土堆积在相对平整的基岩剥蚀面上或新近纪红色粘土层上,黄土土质疏松,极易受到降雨及其他外动力的切割破坏,形成沟谷密布的黄土墚及黄土峁,这种地形地貌是产生黄土滑坡的有利条件和基础^[31-33]。位于研究区中部的晋陕峡谷,其地形起伏度也在 200~300 m,峡谷内深切河谷地貌加上厚层黄土覆盖,为滑坡的发育提供了重要场所。0~200 m 地形起伏度区间对应着汾河及渭河平原地区、毛乌素沙漠地区以及河南西部的平原地区,这些地区地形相对比较平坦,滑坡较少发生,仅在山前洪积平原上部河流切割较深的地区,时有滑坡发生,符合滑坡灾害的发生规律^[34-37]。地形起伏度大于 300 m 的地区主要分布在秦岭、太行山及吕梁山一带,这些地区也有滑

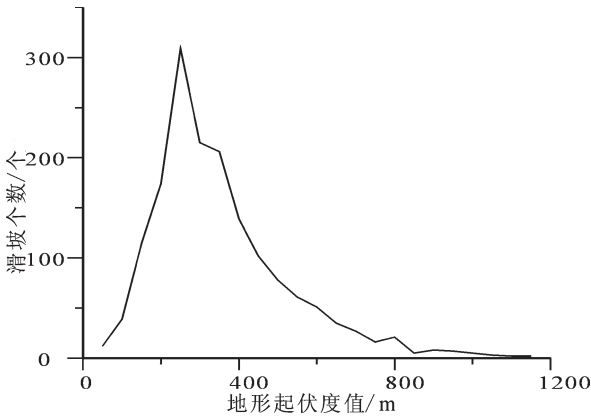


图 8 地形起伏度统计曲线
Fig.8 Statistical curve of relief amplitudes

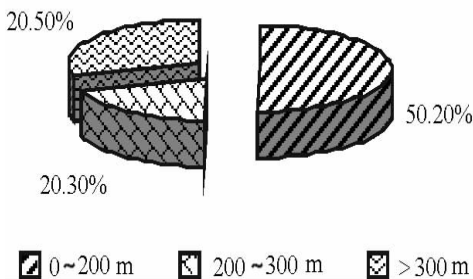


图 9 地形起伏度<200 m,200~300 m 和>300 m 3 个区间面积比

Fig.9 Area proportion of the relief amplitude intervals <200, 200-300 and > 300 m

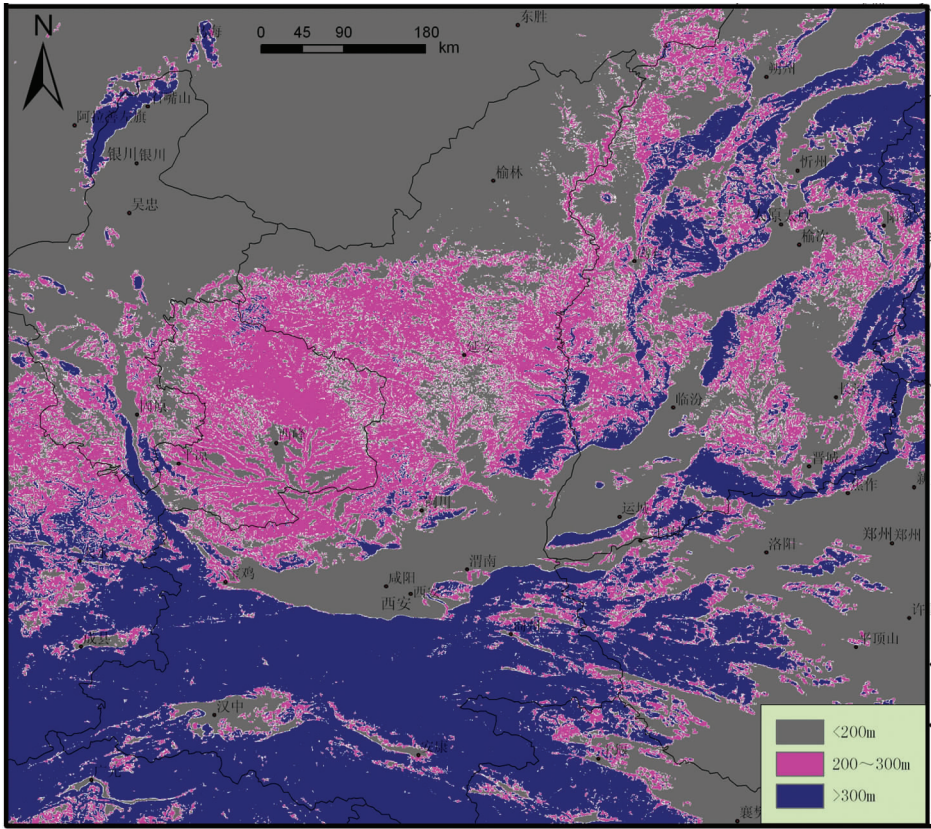


图 10 研究区地形起伏度区间分布
Fig.10 Distribution of relief amplitude intervals in the study area

坡发育,只是历史记录较少。从以上分析看出,地形起伏度在一定程度上能够反映研究区滑坡的宏观分布规律,对揭示滑坡发育的地形条件具有重要的指导意义。

依据上述同样的思路,按照坡度值/滑坡个数的统计曲线(图 7),将研究区坡度重新分为 $10\sim 18^\circ$ 、 $< 10^\circ$ 和 $> 18^\circ$ 3 个区间,由此得到研究区坡度区间分布图(图 11)。其中,坡度范围 $10\sim 18^\circ$ 的地区占研究区总面积的 30.5%,这个区间覆盖了近三分之一研究区总面积。但是从图 11 中放大的细节图可以看出,坡度的区间呈条带状分布,能够较好的显示地形细节,而地形起伏度分布的区域性较明显。对比地形起伏度和坡度区间分布位置,可以看出地形起伏度 $< 200\text{ m}$ 的范围和坡度值 $< 10^\circ$ 的范围基本一致,对应的都是汾河及渭河平原地区和毛乌素沙漠地区等滑坡很少发生的地势平坦区。当坡度值分布在 $10\sim 18^\circ$ 和 $> 18^\circ$ 区间时(图 11),两区间间隔分布,但是从宏观来看,坡度 $10\sim 18^\circ$ 和 $> 18^\circ$ 两个区间的范围和地形

起伏度相应区间的范围基本对应。综上,地形起伏度和坡度各区间分布在很大程度上呈现一致性。

地形参数的廊带分析更能展示研究区地形地貌特征。为此,沿研究区近北向和近东西向各做一条地形廊带,展示廊带内最大高程、最小高程和平均高程剖面以及地形起伏度剖面和坡度剖面(图 12~14),具体计算方法见文献[38]。

从剖面图上,可以看出研究区有以下特征:

(1) 南北向剖面(图 12 中 A-B)清晰显示了该区 4 个基本地貌单元,即毛乌素沙漠地区、黄土高原地区、渭河平原地区和秦岭高山地貌区,这些地貌单元分别对应特征的地形起伏度。

(2) 在沙漠地区,最大、最小和平均海拔高程差异很小,集中分布在 $1300\sim 1500\text{ m}$ 。地形起伏度的值为 $0\sim 100\text{ m}$ 。沙漠地区滑坡极少发育。

(3) 在黄土高原区,最大和平均海拔高程从 1300 m 升高到 1700 m ,与最小高程的差异比沙漠

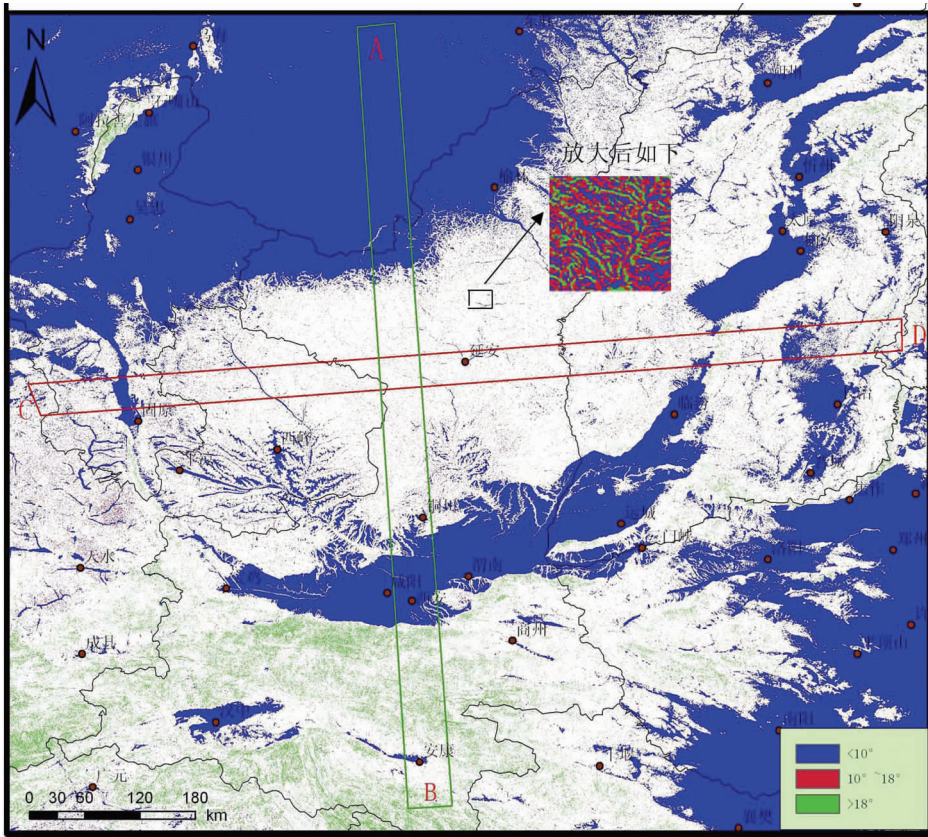


图 11 研究区地形坡度区间分布

Fig.11 Distribution of slope intervals in the study area

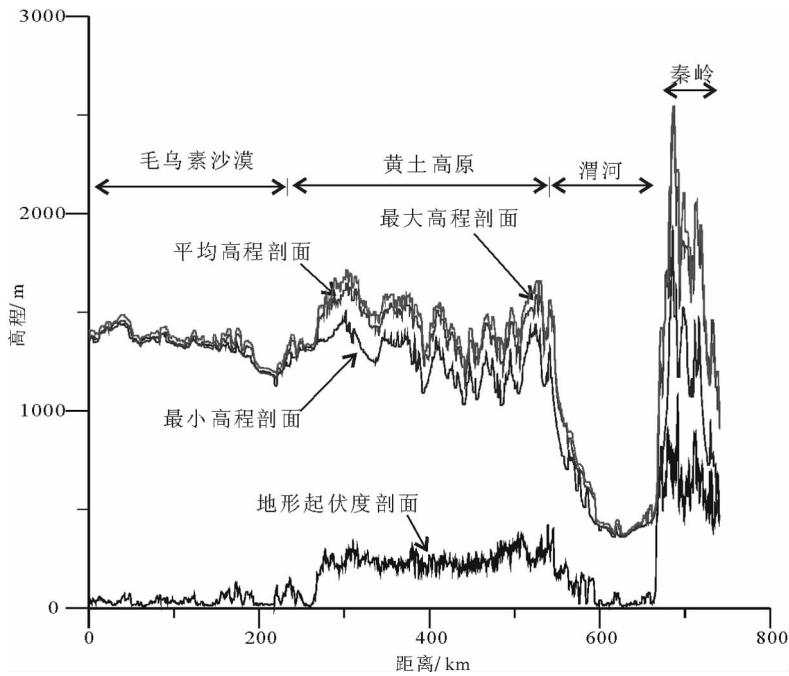


图 12 研究区近南北向(A-B)地形和地形起伏度剖面图(剖面位置见图 11)

Fig.12 Topographic and relief amplitude profiles across section A-B (for location see Fig.11) in the study area

地区显著增大,显示出黄土高原地区地形切割严重的特征,这一特征有利于黄土滑坡的发生。在黄土高原地区和沙漠地区之间,地形起伏度存在明显的变化。前者地形起伏度集中分布在 200~300 m,这一区间正是滑坡频发区间(图 8)。

(4)在渭河平原地区,最大、最小和平均海拔高程都显著降低,降低到~400 m,差异也减小。在渭河河谷地形平坦,地形起伏度小于 200 m,滑坡少量发育。

(5)在秦岭高山地貌区,最大、最小和平均海拔高程急剧升高,从 400 m 升高到 2500 m。最大高程和平均高程与最小高程的差异再次增大,平均地形起伏度在 500 m 以上。尽管这一地区的地形有利于滑坡的发育,但是由于海拔较高,人类活动较少,受条件限制,很多滑坡可能没有被调查到,现有滑坡数据相对偏少。

(6)南北向坡度剖面(图 13)总体形态特征与地形起伏度剖面总体趋势是一致的,由于坡度分布图对地形的细节显示较好,相邻像元之间变化就较大,所以坡度剖面呈现快速变化的特征,但是总体趋势仍与地形起伏度剖面对应。

(7)东西向剖面(图 14 中 C-D)自东向西依次显示黄土高原、晋陕峡谷、吕梁山、汾河谷地和太行山地

貌单元。地形起伏度剖面大部分集中在 200~300 m,只有在吕梁山区和太行山区地形起伏度大于 500 m。研究区东西向地貌变化不大,而从南向北地貌类型多变,显示出研究区地貌的带状分布特征。

通过分析地形起伏度/滑坡个数统计曲线、地形坡度/滑坡个数统计曲线、地形起伏度和坡度区间分

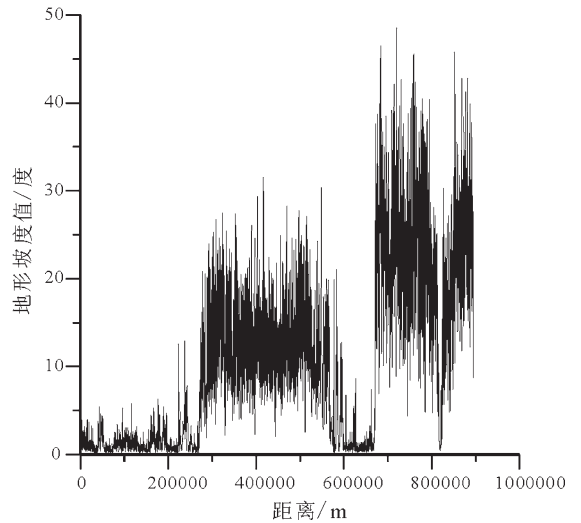


图 13 研究区近南北向(A-B)坡度剖面
Fig.13 Nearly N-S-trending slope profile (section A-B) in the study area

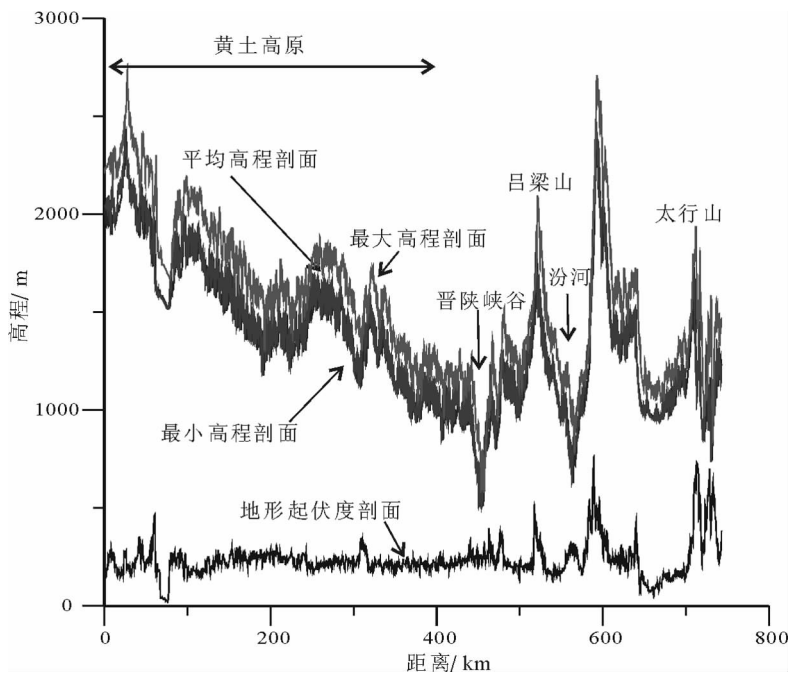


图 14 研究区近东西向(剖面 C-D)地形与地形起伏度剖面图(剖面位置见图 11)
Fig.14 Nearly E-W-trending profile of topography and relief amplitudes (section C-D) (for the location, see Fig. 11) in the study area

布图以及研究区南北向和东西向地形剖面,表明地形起伏度和坡度与区域滑坡的发育存在很大相关性,地形起伏度分析对区域滑坡分布规律具有重大意义,而坡度分析能够弥补地形分析的细节,两者相互补充,共同揭示区域滑坡的发生和分布规律。

6 初步结论

地形起伏度和坡度提取方法简单,便于计算机程序实现,操作具有可重复性,对于区域滑坡空间分布规律和预测具有重要的实践意义和应用价值。将地形起伏度和坡度与区域滑坡灾害的发生进行统计分析,发现它们之间存在着很好的相关性。研究区滑坡发育区的地形起伏度主要在 200~300 m,该区间发育的滑坡占研究区滑坡总数的 48.5%,面积占研究区总面积的 20.3%,所对应的地貌类型为切割丘陵、黄土塬及黄土梁;此区间普遍发育厚层黄土,沟谷极其发育,为滑坡的发育提供了便利的条件。小于 200 m 地形起伏度区间对应着汾河及渭河平原区、毛乌素沙漠地区以及河南西部的平原地区,这些地区地形比较平坦,滑坡较少发生。地形起伏度大于 300 m 的地区主要分布在秦岭、太行山及吕梁山等山地地貌区,这些地区也有滑坡发育,但历史记录较少。研究区滑坡集中发育的地形坡度区间为 10~18°,该区间发育的滑坡占研究区滑坡总数 46.7%,面积占研究区总面积的 30.5%。总体上,地形起伏度与坡度相互对应,各区间分布呈现较好的一致性,它们共同反映区域滑坡发育的分布规律。

地形起伏度和坡度不仅可以定量描述地形地貌特征,同时和滑坡灾害的发育存在很大相关性。研究区滑坡发育区的地形起伏度和坡度分别集中在 200~300 m 和 10~18°,而这个区间在全国范围内是否适用,还有待进一步研究。本次研究结果为区域滑坡灾害评价和预测提供了一条新的思路,对区域防灾和规划具有宏观决策意义。

参考文献 (References)

[1] 涂汉明,刘振东.中国地势起伏度研究[J].测绘学报,1991,20(4):311-319.
Tu Hanming, Liu Zhendong. Study on relief amplitude in China[J]. Acta Geodaetica et Cartographic Sinica, 1991, 20 (4):311-319(in Chinese with English abstract).

[2] 陈志明.论中国地貌图的研制原则、内容与方法[J].地理学报,1993,48(2):105-113.

Chen Zhiming. On the principle, contents and methods used to compile the Chinese geomorphological maps [J]. Acta Geographica Sinica, 1993, 48(2):105-113(in Chinese with English abstract).

[3] 唐飞,陈曦,程维明,等.基于 DEM 的准噶尔盆地及其西北山区地势起伏度研究[J].干旱区地理,2006,29(3):388-392.
Tang Fei, Chen Xi, Cheng Weiming, et al. Relief amplitude in Junggar Basin and peripheral Northwest Mountains [J]. Arid Land Geography, 2006, 29(3):388-392(in Chinese with English abstract).

[4] Brew G, Barazangi M, Sawaf T, et al. Tectonic map and geologic evolution of Syria: The role of GIS[J]. The Leading Edge, 2000, 19: 176-182.

[5] Rayfield E J, Barrett P M, McDonnell R A, et al. A geographical information system (GIS) study of Triassic vertebrate biochronology [J]. Geological Magazine, 2005, 142:327-354.

[6] 张会平,杨农,张岳桥,等.岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义[J].第四纪研究,2006,26(1):126-135.
Zhang Huiping, Yang Nong, Zhang Yueqiao, et al. Geomorphology of the Mingjiang drainage system and its structural implications [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1):126-135.

[7] 周启鸣,刘学军.数字地形分析[M].北京:科学出版社,2006:52-75.
Zhou Qiming, Liu Xuejun. Digital Terrain Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2006:52-75(in Chinese).

[8] 汤国安,张勇,刘咏梅,等.不同比例尺 DEM 提取地面坡度精度研究[J].水土保持通报,2001,21(1):53-56.
Tang Guoan, Zhang Yong, Liu Yongmei, et al. Research on accuracy of slope derived from DEMs of different map scales [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21 (1):53-56 (in Chinese with English abstract).

[9] Florinsky I V. Accuracy of local topographic variable derived from digital elevation models [J]. INT. J. Geographical Information Science, 1998, 12(1):47-61.

[10] Jaromir D. Proposal of the international geomorphological map of Europe at scale 1:2,500,000 [J]. Physical Geography, 1970, 1:28-29.

[11] 汤国安,刘学军,房亮,等. DEM 及数字地形分析中尺度问题研究综述[J].武汉大学学报(信息科学版),2006,31(12):1059-1068.
Tang Guoan, Liu Xuejun, Fang Liang, et al. Review on the scale issue in DEMs and digital terrain analysis [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31 (12):1059-1068(in Chinese with English abstract).

[12] 汤国安,龚健雅,陈正江,等.数字高程模型地形描述精度量化模拟研究[J].测绘学报,2001,30(4):361-365.
Tang Guoan, Gong Jianya, Chen Zhengjiang, et al. Simulation on the accuracy of DEM terrain representation [J]. Acta Geodaetica et Cartographic Sinica, 2001, 30(4):361-365(in Chinese with English abstract).

[13] 程三友,刘少峰,张会平,等.大别山构造地貌的 DEM 初步分析[J].地质力学学报,2005,11(4):333-340.
Cheng Sanyou, Liu Shaofeng, Zhang Huiping, et al. DEM analysis of the tectono-geomorphology of the Dabie orogenic belt [J].

- Journal of Geomechanics, 2005, 11 (4):333-340 (in Chinese with English abstract).
- [14] 殷坤龙, 朱良峰. 滑坡灾害空间区划及 GIS 应用研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(2):279-284.
- Yin Kunlong, Zhu Liangfeng. Landslide hazard zonation and application of GIS[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(2):279-284 (in Chinese with English abstract).
- [15] 戴福初, 李军. 地理信息系统在滑坡灾害研究中的应用[J]. 地质科技情报, 2000, 19(1):91-96.
- Dai Fuchu, Li Jun. Applications of geographical information systems in landslide studies [J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(1):91-96(in Chinese with English abstract).
- [16] 辜寄蓉, 范晓, 彭东. 九寨沟地质灾害预测的空间分析模型[J]. 中国地质, 2002, 29(1):109-112.
- Gu Jirong, Fan Xiao, Peng Dong. Spatial analysis model for the forecast of geological disasters in Jiuzhaigou. [J]. Geology in China, 2002, 29(1):109-112(in Chinese with English abstract).
- [17] 温守钦, 李仁锋, 任群智, 等. GIS 技术在地质灾害区划中的应用[J]. 中国地质, 2005, 32(3):512-517.
- Wen Shouqin, Li Renfeng, Ren Qunzhi, et al. Application of GIS technology in the regionalization of geological hazards[J]. Geology in China, 2005, 32(3):512-517(in Chinese with English abstract).
- [18] 乔建平, 赵宇. 滑坡危险度区划研究评述[J]. 山地学报, 2001, 19(2):157-160.
- Qiao Jianping, Zhao Yu. Review on risk degree regionalization of landslide[J]. Journal of Mountain Research, 2001, 19(2):157-160 (in Chinese with English abstract).
- [19] 孟晖, 张岳桥, 杨农. 青藏高原东缘中段地质灾害空间分布特征分析[J]. 中国地质, 2004, 31(2):218-224.
- Meng Hui, Zhang Yueqiao, Yang Nong. Analysis of the spatial distribution of geohazards along the middle segment of the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geology in China, 2004, 31(2):218-224(in Chinese with English abstract).
- [20] 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 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4):16-19.
- Qiao Jianping, Wu Caiyan. The influence of relative elevation on landslide occurrence within Yunyang-Wushan section in the Three Gorges Reservoir region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(4):16-19(in Chinese with English abstract).
- [21] 乔建平, 吴彩燕, 田宏岭. 三峡库区云阳-巫山段地层因素对滑坡发育的贡献率研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17):2920-2924.
- Qiao Jianping, Wu Caiyan, Tian Hongling. Contribution rate research of stratum to landslide growth of Yunyang-Wushan segment in Three Gorges Reservoir region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (17):2920-2924 (in Chinese with English abstract).
- [22] Tang Guoan. A Research on the Accuracy of Digital Elevation Models [M]. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张子瑞, 王建力, 何潇, 等. 陕西地质灾害形成条件与对策探讨 [J]. 西安文理学院学报, 2006, 9(4):99-103.
- Zhang Zirui, Wang Jianli, He Xiao, et al. Causes of geological hazards and countermeasures in Shaanxi Province [J]. Journal of Xi'an University of Arts and Science (Natural Science Edition), 2006, 9(4):99-103(in Chinese with English abstract).
- [24] Bernhard Rabus, Michael Eineder, Achim Roth, et al. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2003, 57:241-262.
- [25] 刘新华, 杨勤科, 汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1):57-59.
- Liu Xinhua, Yang Qinke, Tang Guoan. Extraction and application of relief of China based on DEM and GIS method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(1):57-59(in Chinese with English abstract).
- [26] 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度最佳统计单元的求证[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 1990, 12(3):266-271.
- Tu Hanming, Liu Zhendong. Demonstrating on the optimum statistic unit of relief amplitude in China [J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 1990, 12 (3):266-271 (in Chinese with English abstract).
- [27] Chen Zhiming, Liu Zhendong, Yu Xiu bodong. National geomorphologic mapping of China [J]. ITC Journal, 1991, 1:19-25.
- [28] 吴玮江, 王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2):36-40.
- Wu Weijiang, Wang Nianqin. Basic types and active features of loess landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(2):36-40(in Chinese with English abstract).
- [29] 殷跃平, 张作辰, 黎志恒, 等. 兰州皋兰山黄土滑坡特征及灾度评估研究[J]. 第四纪研究, 2004, 24(3):302-310.
- Yin Yueping, Zhang Zuochen, Li Zhiheng, et al. Occurrence and hazard assessment on loess landslide of Gaolanshan in Lanzhou [J]. Quaternary Sciences, 2004, 24 (3):302-310 (in Chinese with English abstract).
- [30] 张抗. 鄂尔多斯断块构造和资源[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1989:1-394.
- Zhang Kang. Tectonics and Resources of Ordos Faulted-Block [M]. Xian: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 1989:1-394 (in Chinese with English abstract).
- [31] Guan Huiping, Sun Yi. Analyzing typical characteristics of loess landslides in regional space-time activities in Gansu [J]. Journal of Lanzhou Railway University (Natural Sciences), 2001, 20(1):36-41.
- [32] 王志荣, 王念秦. 黄土滑坡研究现状综述 [J]. 中国水土保持, 2004, 11:16-18.
- Wang Zhirong, Wang Nianqin. A summary of present study on loess landslides [J]. Soil and Water Conservation in China, 2004,

- 11:16–18(in Chinese with English abstract).
- [33] Edward Derbyshire, Theo Van Asch, Armelle Billard, et al. Modelling the erosional susceptibility of landslide catchments in thick loess: Chinese variations on a theme by Jan de Ploey [J]. *Catena*, 1995, 25:315–331.
- [34] 王维升, 万鑫. 浅议黄土滑坡的分布规律及形成条件[J]. *灾害学*, 2001, 16(2):82–86.
Wang Weisheng, Wan Xin. Distribution regularity and forming condition of loess landslide[J]. *Journal of Catastrophology*, 2001, 16(2):82–86(in Chinese with English abstract).
- [35] Zhou Jinxing, Zhu Chunyun, Zheng Jinming, et al. Landslide disaster in the loess area of China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2002, 13(2):157–161.
- [36] 张春山, 张业成, 马寅生. 黄河上游地区崩塌、滑坡、泥石流地质灾害区域危险性评价[J]. *地质力学学报*, 2003, 9(2):143–153.
Zhang Chunshan, Zhang Yecheng, Ma Yinsheng. Regional dangerous on the geological hazards of collapse, landslide and debris flows in the upper reaches of the Yellow River [J]. *Journal of Geomechanics*, 2003, 9(2):143–153(in Chinese with English abstract).
- [37] 马小计, 杨自安, 邹林, 等. 抚顺市市区地质灾害遥感调查研究[J]. *中国地质*, 2006, 33(5):1167–1173.
Ma Xiaoji, Yang Zian, Zou Lin, et al. Remote sensing survey of geological hazards in the urban district of Fushun City [J]. *Geology in China*, 2006, 33(5):1167–1173(in Chinese with English abstract).
- [38] 李勇, Densmore A L, 周荣军, 等. 青藏高原东缘数字高程剖面及其对晚新生代河流下切深度和下切速率的约束[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(2):236–243.
Li Yong, Densmore A L, Zhou Rongjun, et al. Profiles of digital elevation models (DEM) crossing the eastern margin of the Tibetan Plateau and their constraints on dissection depth and incision rates of late Cenozoic rivers [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(2):236–243(in Chinese with English abstract).

Application of the relief amplitude and slope analysis to regional landslide hazard assessments

GUO Fang-fang¹, YANG Nong², MENG Hui³, ZHANG Yue-qiao^{1,2}, YE Bao-ying⁴

(1. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

3. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China

4. Department of Land Science and Techniques, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the SRTM3–DEM data and by using the ArcGIS platform, the authors calculated and analyzed the relief amplitudes and slopes of the Ordos area and its vicinity, established the correlation among the relief amplitudes, slopes and landslide hazard occurrence using regional landslide hazard survey data, and discussed the geomorphological significance of the relief amplitude analysis. The results show that in the study area landslides mainly occur in areas with relief amplitudes ranging from 200 to 300 m. The landslides in this amplitude interval account for 48.5% of the total number of landslides and 20.3% of the total surface area of the study area. Those areas have relief slopes ranging from 10° to 18°, and the landslides with this slope interval account for 46.7% of the total number of landslides and 30.5% of the total surface area of the study area. Geomorphologically the areas of frequent landslide occurrence correspond to monadnocks, loess tablelands and loess ridges. Analysis of topographic features of longitudinal and latitudinal profiles across the study area shows that the relief amplitude and slope have a good correlation with the occurrence and distribution of landslides. This correlation provides a new idea for assessments of regional landslide hazards and is of great significance to regional geohazard planning and prediction.

Key words: relief amplitude; slope; landslide; DEM; GIS; correlation

About the first author: GUO Fang-fang, female, born in 1982, master, engages in the study of tectono-geomorphology and GIS; E-mail: bee3344@gmail.com.

About the Corresponding author: ZHANG Yue-qiao, male, born in 1963, professor, mainly engages in the teaching and study of neotectonics and structural geology; E-mail: yueqiao-zhang@sohu.com.