

doi:10.3799/dqkx.2016.026

陕北黄土高原不同地貌类型区黄土滑坡频率分布

邱海军^{1,2}, 崔鹏¹, 胡胜², 刘琪², 王彦民³, 高宇², 邓妹凤²

1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041

2. 西北大学城市与环境学院, 陕西西安 710127

3. 陕西理工学院化学与环境科学学院, 陕西汉中 723001

摘要: 黄土滑坡是西北地区最为严重的地质灾害, 频率分布对于区域滑坡风险评估具有重要的意义, 借鉴粒度分析方法研究黄土滑坡分布情况, 提出滑坡规模径概念, 并通过 Gamma 分布函数对滑坡规模频率曲线进行了拟合. 结果表明: (1) 在区域尺度上, 可以借鉴粒度分析的理论和方法分析区域滑坡规模百分含量; (2) 在双对数坐标下, 频率曲线具有“偏转效应”, 而 Gamma 分布函数在描述滑坡规模径频率分布方面具有广泛的适应性, 能够很好地拟合黄土滑坡规模频率; (3) 无论是黄土滑坡的数量还是规模, 以塬为主的黄土丘陵区宝塔区都是受滑坡灾害威胁最为严重的区域; 但黄土地貌在由塬向岭区的演变过程中, 黄土滑坡规模变异或离散程度逐渐减小.

关键词: 滑坡; 规模频率; Gamma 曲线; 黄土高原.

中图分类号: P954

文章编号: 1000-2383(2016)02-0343-08

收稿日期: 2015-08-23

Size-Frequency Distribution of Landslides in Different Landforms on the Loess Plateau of Northern Shaanxi

Qiu Haijun^{1,2}, Cui Peng¹, Hu Sheng², Liu Qi², Wang Yanmin³, Gao Yu², Deng Meifeng²

1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

2. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China

3. School of Chemistry and Environmental Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China

Abstract: Loess landslide is the most catastrophic geohazard in the northwest area of China. Frequency distribution plays an important role in prediction and risk assessment of landslides since it can be used to find out certain distribution laws in different landslides. In this paper, the loess landslide distribution is studied by using method of grain size analysis theory, and the authors put forward the concept of landslide size diameter and use the Gamma distribution curve to fit size-frequency of landslides in different landforms of the loess plateau. The results show that: (1) At the regional scale, landslides can be viewed as “particles” widely distributed in the area, regional landslide scale percentage and its distribution can be obtained by application of grain size analysis theories and methods; (2) At log-log coordinates, frequency curve has a “rollover effect”, and the Gamma distribution function describes well the size frequency distribution of landslides; (3) The loess landslide scale variation or discrete degree decreases from loess tableland to loess hill in Baota district which is mainly covered by loess ridge suffering most serious threat of the landslide disasters both in number and size.

Key words: landslide; size-frequency; Gamma function; loess plateau.

中国是世界上滑坡灾害较严重的国家之一(罗渝等, 2014; 吴益平等, 2014). 黄土滑坡是黄土高原

独特而常见的山地灾害, 自国家实施西部大开发战略以来, 工程活动急剧增多, 黄土滑坡发生频繁、分

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41401602); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(No.2014JQ2-4021); 西北大学科学研究基金(No.12NW32).

作者简介: 邱海军(1983-), 男, 副教授, 博士, 从事自然地理学等相关教学研究工作. E-mail: rgbitxpl@163.com

引用格式: 邱海军, 崔鹏, 胡胜, 等, 2016. 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, 41(2): 343-350.

布广泛,给当地人民的生命财产带来严重威胁(许领等,2009)。正确认识黄土滑坡的发生、发展和分布现状,对各类工程项目的布设、滑坡风险评估、滑坡整治及其防灾减灾有着重要的意义(李同录等,2007)。因此,黄土滑坡成为近年工程地质和灾害地理学研究的热点问题(雷祥义,1999;许领等,2008)。

规模频率分布(magnitude-frequency distribution)是一组区域滑坡规模参数数据中不同取值的频数相对于总数的比率分布情况。规模频率对于滑坡灾害的预测和风险评估具有重要的作用,利用它可以找出规模差异巨大的滑坡之间所存在的定量关系,并提供特定地点和特定时间段区域滑坡频率分布情况(Brardinoni and Church, 2004; Hungr *et al.*, 2008)。很多学者通过对全球各个地区现有滑坡的观测总结发现,随着滑坡面积和体积的增大,滑坡的数量急剧减少,并且这种数量关系符合幂律。进一步的研究表明当滑坡规模较小时,在双对数曲线上滑坡崩塌频率分布会出现“偏转效应(rollover effect)”,即规模频率曲线在双对数坐标上并不是一条直线,而是在小规模区间上会发生偏转(Brardinoni and Church, 2004; Frattini and Crosta, 2013)。目前,偏转的原因还未完全研究清楚,很多学者对此提出不同的解释,其中被广泛讨论的是地貌对滑坡的影响(van Den Eeckhaut *et al.*, 2007; Goswami *et al.*, 2011)。另有很多学者试图通过分布曲线进行拟合(Guthrie and Evans, 2004; Brunetti *et al.*, 2009; Chaytor *et al.*, 2009; Corominas and Moya, 2010; Florsheim and Nichols, 2013)。Malamud *et al.* (2004)分析了加利福尼亚、意大利中部和危地马拉 3 个最近具有良好编目的滑坡数据库,发现滑坡面积概率函数很好地符合截断反伽马(truncated inverse Gamma)分布。Stark and Hovius (2001)分析了新西兰和台湾的 3 个滑坡数据库后,发现滑坡面积的概率密度函数很好地符合 double Pareto 概率分布。姚令侃等(2010)通过沙堆模型和崩塌方量调查在这方面进行了探索性研究,也认识到这种幂律关系。Dai and Lee (2001)和 Dai *et al.* (2011)对汶川地震和降雨型滑坡体积与频率的关系做了分析,发现在滑坡规模较小时频率分布曲线存在弯曲。邱海军等(2013)也曾以宁强县区域滑坡和崩塌为例,发现用幂函数拟合(双对数坐标系下)的确会出现“偏转效应”,必须用分段函数才能拟合。

已有关于区域滑坡规模频率的研究多集中于面积和体积规模频率分布方面。众所周知,土壤学中为

了研究各种粒度的百分含量及粒度分布情况,通常进行土壤颗粒的粒度分析,计算其筛上筛下累积分析曲线等;而在区域尺度上,滑坡可以被视为广泛分布的“颗粒”。为了更好地研究黄土滑坡的规模百分含量及其分布情况,本文通过学科交叉借鉴了土壤学中粒度分析的概念,提出了滑坡规模径的概念,进行了规模径的直方图分析;在此基础上,采用 Gamma 分布曲线对黄土高原不同地貌类型区 3 个县(区)黄土滑坡进行了规模频率分析,以期认清不同地貌对黄土滑坡规模频率的影响,进而拓展了区域滑坡的研究领域。

1 研究区概述与研究方法

1.1 研究区概述

黄土高原是世界上最大的黄土沉积区,位于黄河中上游地区,分布在 $33^{\circ}43' \sim 41^{\circ}16' \text{N}$, $100^{\circ}54' \sim 114^{\circ}33' \text{E}$,包括太行山以西、青海省日月山以东、秦岭以北、长城以南广大地区,平均海拔在 1500~2000 m,面积约 $62.14 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。黄土高原自南向北纵跨暖温带和中温带两个热量带,自东向西横贯半湿润和半干旱两个干湿区,具有典型的大陆性气候特征。大部分地区年降水量在 400 mm 左右,全年总雨量少且雨季集中,年变化率大;气候干燥,蒸发量大,无霜期短;大风、霜冻等自然灾害现象频繁。

自新生代晚期以来,黄土高原一直保持整体间歇性上升隆起。受侵蚀基准面控制,高原区遭受到强烈的侵蚀切割,河流水系发育,沟谷纵横,地形支离破碎,这为黄土滑坡提供了必要的重力条件和活动空间。加之受自然和人为因素影响,黄土滑坡灾害极易发生。据统计全国约有 1/3 的滑坡灾害发生于黄土地区(文宝萍等,1997);陇海线西宝段卧龙寺黄土滑坡、洒勒山黄土滑坡、天水锻压机床厂黄土滑坡、白鹿塬滑坡、蒋刘滑坡、黄茨村滑坡等许多著名大型灾害性滑坡均发生于黄土地区(刘红玫和石玉成,2006)。

根据戴维斯侵蚀循环理论,黄土地貌的演变趋势是黄土塬→黄土梁→黄土峁。

黄土塬(loess tableland)为顶面平坦宽阔的黄土高地,又称黄土平台。其顶面平坦,边缘倾角为 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$,周围为沟谷深切,它代表黄土的最高堆积面。黄土塬为黄土高原地貌发育初期阶段。本文以洛川县作为黄土塬区代表。

黄土梁(loess ridge)为长条状的黄土丘陵。梁顶倾斜 $3^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 者为斜梁。梁顶平坦者为平梁。丘与鞍状

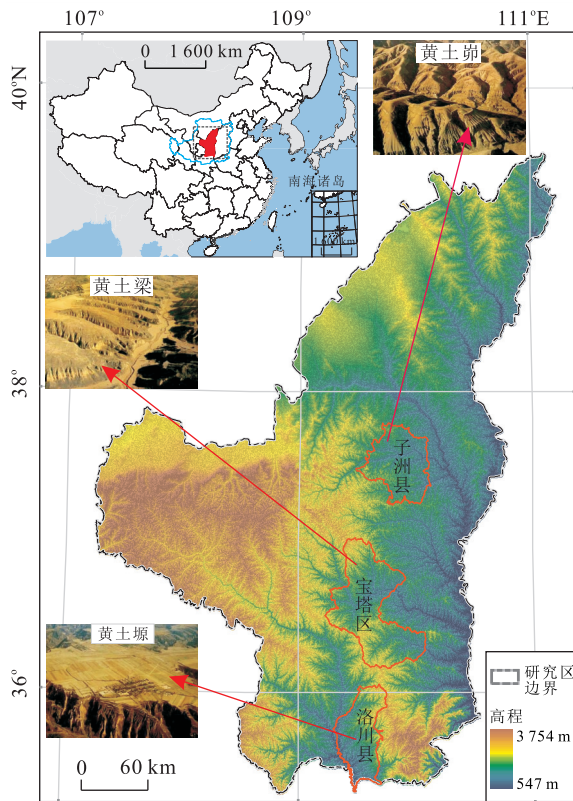


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

中国地图据中华人民共和国地图(1:22 000 000),2010年第一版,星球地图出版社,北京

交替分布的梁称为崩梁。平梁多分布在塬的外围,是黄土塬为沟谷分割生成,又称破碎塬。本文以宝塔区作为黄土梁区代表。

黄土崩(loess hill)为沟谷分割的穹状或馒头状黄土丘。崩顶的面积不大,以 $3^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 向四周倾斜,并逐渐过渡为坡度 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 的崩坡。若干个崩大体排列在一条线上的为连续崩,单个的为孤立崩。连续崩大多是河沟流域的分水岭,由黄土梁侵蚀演变而成。本文以子洲县作为黄土崩区代表(图1)。

1.2 数据来源

本文数据主要有遥感数据和基础数据两大类。遥感数据包括 SPOT 2.5 m 全色、10 m 多光谱数据以及 TM 多光谱数据。基础数据包括小比例尺滑坡详查数据,数字线划图(digital line graphic,简称 DLG),河网水系图,断裂带图以及宝塔区地质图。通过对遥感图像进行正射校正、图像融合、图像增强处理、图像镶嵌与裁剪等步骤,采用点、线和面相结合的野外滑坡调查方式,辅之以地质罗盘、GPS、红外测距仪等野外调查设备与仪器进行大量野外调查,

通过数字高程模型(digital elevation model,简称 DEM)渲染、地形阴影等增强三维效果和滑坡形态特点,开展区域滑坡遥感解译与基于地貌分析的滑坡识别,并且通过野外实地调查,对解译标志进行核实、补充和完善,提高解译精度和工作质量。在大量野外调查和室内精细遥感解译的基础上,建立完整的包含有宝塔区黄土滑坡位置、数量、分布、规模等信息的滑坡详细编录数据库。

1.3 研究方法

1.3.1 滑坡规模径的定义 借鉴土壤学等相关学科粒度分析概念,本文将滑坡规模径定义为:滑坡在空间范围内所占据的线形尺寸,是滑坡几何性质的一维表示,也是滑坡最基本的几何特征。关于滑坡规模径这种所谓的尺寸表征方法有很多,有三轴径、定向径、当量径等。本文采用三轴径中的三轴几何平均径作为度量这种尺寸的表征方法,其计算公式为:

$$D = \sqrt[3]{l b h}, \quad (1)$$

其中, D 为单体滑坡三轴几何平均径(m), l , b , h 分别为单体滑坡的长(m)、宽(m)和厚(m)。

1.3.2 滑坡概率密度计算 滑坡概率密度与规模径之间的关系可以表示为:

$$P(D) = \frac{1}{N_{LT}} \frac{\delta N_L}{\delta d}, \quad (2)$$

其中, $P(D)$ 为滑坡概率密度; N_{LT} 为编目区域内黄土滑坡总数; δd 为黄土滑坡规模径增量(m); δN_L 为处于滑坡规模径 $d \sim \delta d$ 之间的黄土滑坡数量。

1.3.3 Gamma 概率分布模型 Gamma 分布是统计学中的一种连续概率函数(Bishop,2006),灵活性大、适应性强且积分形式简单,包含 α 和 β 两个参数,其中 α 为形状参数, β 为尺度参数,其一般概率密度分布函数 $Ga(D)$ (probability density function,简称 PDF)形式如下:

$$Ga(D) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} D^{\alpha-1} e^{-\frac{D}{\beta}}, D > 0, \quad (3)$$

其中, $\Gamma(D) = \int_0^\infty t^{D-1} e^{-t} dt$ 为 Gamma 函数。

滑坡灾害的危险性可以表述为:在给定时间内、给定地形、岩性、构造、土地利用方式等条件下,滑坡发生大于等于某一规模的概率。用数学公式可以表述为:

$$H = P, (D \geq D_0), \quad (4)$$

其中, H 为滑坡危险性, D 为规模径, D_0 为给定规模径。

因此,通常情况下人们关注的是大于或等于某

一规模滑坡的发生概率,也就是累积分布函数(cumulative distribution function,简称CDF),它是概率密度分布函数在某一特定值的积分形式。

2 结果与分析

2.1 规模频率分布直方图

按照黄土滑坡规模径级大小可将黄土滑坡分为 < 20 m, 20 ~ 40 m, 40 ~ 60 m, 60 ~ 80 m, 80 ~ 100 m, 100 ~ 120 m, 120 ~ 140 m, 140 ~ 160 m, 160 ~ 180 m 和 180 ~ 200 m 这 10 个径级组.由图 2 可知,洛川县黄土滑坡三轴几何平均径在 20~40 m 所占比重最大,占到滑坡总数的 33.33%;其次径级为 40~60 m 的黄土滑坡占到 27.27%;径级为 60~80 m 的黄土滑坡占到滑坡总数的 12.12%;径级为 0~20 m 的黄土滑坡占到滑坡总数的 15.15%;径级 >80 m 的黄土滑坡所占比重较小,占到滑坡总数的 12.12%.宝塔区黄土滑坡三轴几何平均径在 40~60 m 所占比重最大,占到滑坡总数的 27.30%;其次径级为 60~80 m 的黄土滑坡占到 21.50%;径级为 20~40 m 的黄土滑坡占到滑坡总数的 17.41%;径级为 80~100 m 的黄土滑坡占到滑坡总数的 17.06%;径级 >100 m 的黄土滑坡所占比重较小,占到滑坡总数的 14.33%.子洲县黄土滑坡三轴几何平均径在 20~40 m 所占比重最大,占到滑坡总数的 47.37%;其次为径级为 40~60 m 的黄土滑坡,占到滑坡总数的 17.11%;径级为 0~20 m 的黄土滑坡占到滑坡总数的 5.26%;径级 >80 m 的黄土滑坡所占比重较小,占到滑坡总数的 5.26%。

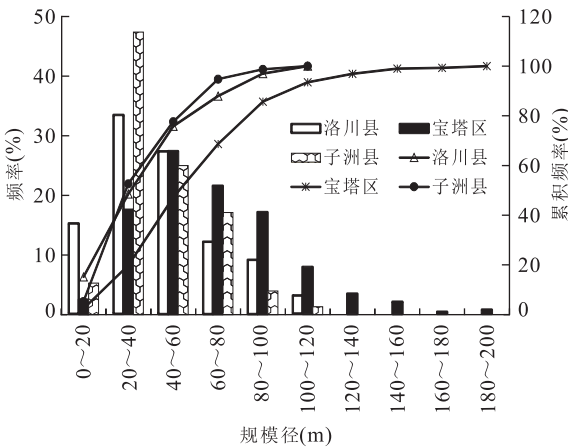


图 2 研究区黄土滑坡三轴几何平均径分布

Fig.2 Distribution of different diameter class

2.2 规模径频率分布偏转效应

由图 3 可知,黄土滑坡规模频率分布曲线包括偏转和幂律两部分.由于地形地貌等诸多因素限制,从中等规模以上到大型滑坡之间的规模频率分布遵从幂指关系(power-law relation),并且随着规模的增大其发生频率急剧衰减.在小规模上,滑坡频率分布会出现偏转效应.在双对数坐标下,子洲县、宝塔区和洛川县的黄土滑坡规模径分别在 < 45 m、<80 m 和 <30 m 处发生了偏转,斜率平缓,滑坡分布明显不服从幂律.子洲县黄土滑坡规模径在 45 m 以上的频率分布曲线满足斜率为 -3.477 5 幂函数;宝塔区黄土滑坡规模径在 80 m 以上的频率分布曲线满足斜率为 -4.468 9 幂函数;洛川县黄土滑坡规模径在 30 m 以上的频率分布曲线满足斜率为 -2.227 7 幂函数。

由此可知在双对数坐标上,规模频率曲线会出现偏转效应,因此不能用幂指数函数进行拟合.为了找出适应性更好的曲线,本文拟采用 Gamma 分布曲线进行黄土滑坡规模频率分布的拟合。

2.3 规模频率 Gamma 分布 P-P 图检验

当不能确定已有数据服从何种分布时,首先要对数据进行分布预检验,以保证后续工作的有效性。

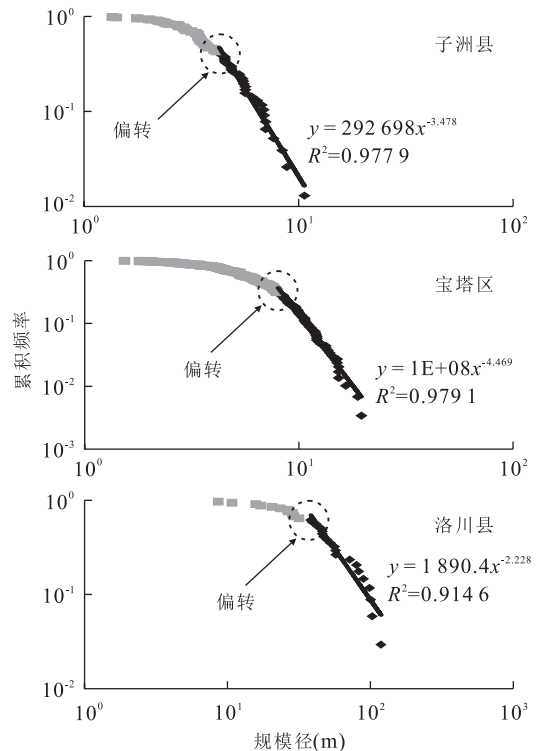


图 3 不同地貌类型区规模频率分布曲线偏转效应

Fig.3 Rollover of cumulative magnitude-frequency curve for the landslides in different county and district

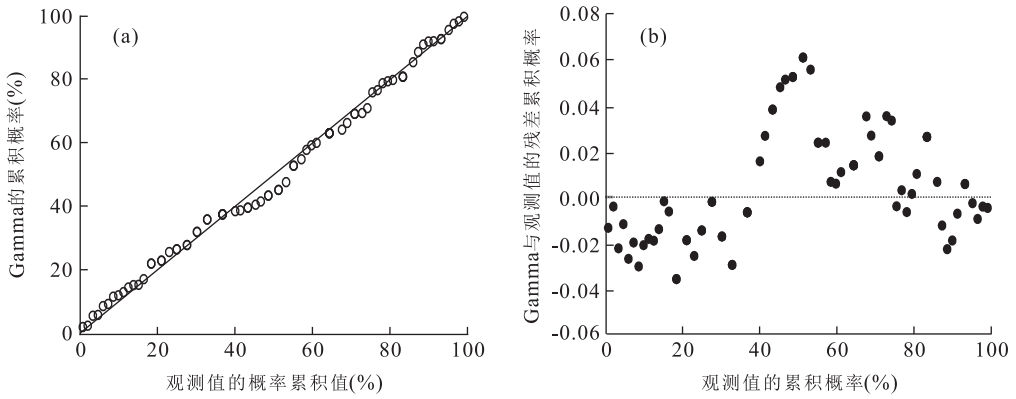


图 4 子洲县(黄土峁区)黄土滑坡三轴几何平均径 Gamma $P-P$ 散点图(a)和无趋势 Gamma $P-P$ 散点图(b)

Fig.4 Gamma $P-P$ plot (a) and detrended Gamma $P-P$ plot (b) of landslide diameter in Zizhou County

$P-P$ 概率图是根据某变量概率累积比与指定分布概率累积比之间的关系,检验样本的概率分布是否服从某种理论分布的图形.利用 $P-P$ 概率图检验实际数据是否符合某种指定的分布时,当符合指定分布,则数据对应的散点位于图中右斜对角线位置,且近于直线分布;而在无趋势 $P-P$ 图中则呈离散分布,且对称于以 0 为水平轴的带内.如果散点不成直线,但有一定规律可循,可对变量数据进行某种转换方式进行转化,使转化后的数据更接近指定的分布.

通过对黄土高原不同地貌类型区黄土滑坡三轴几何平均径进行 Gamma 分布检验,如图 4~6 所示;Gamma $P-P$ 散点图近似呈一条直线;而无趋势 Gamma $P-P$ 图的散点则均匀分布于纵坐标为 0 的直线以下,因此可认为黄土高原不同地貌类型区黄土滑坡三轴几何平均径分布服从 Gamma 分布.

2.4 基于 Gamma 分布函数的规模径分布

由图 7 可知,Gamma 曲线能很好地拟合黄土滑坡规模频率分布曲线,3 个县(区)拟合值分别位于

95%置信区间范围内,子洲县黄土滑坡规模频率曲线拟合优度值 $R^2=0.9926(P<0.01)$,宝塔区黄土滑坡规模频率曲线拟合优度值为 $R^2=0.9984(P<0.01)$,洛川县黄土滑坡规模频率曲线拟合优度值 $R^2=0.9892(P<0.01)$.经分析计算,子洲县黄土滑坡 Gamma 累积频率曲线形状参数 $\alpha=5.301$ 、尺度参数 $\beta=8.574$,分别落入 95%置信区间 $[3.894,7.217]$ 和 $[6.204,11.850]$;宝塔区黄土滑坡 Gamma 累积频率曲线形状参数 $\alpha=4.382$ 、尺度参数 $\beta=15.3907$,分别落入 95%置信区间 $[3.749,5.123]$ 和 $[13.044,18.160]$;洛川县黄土滑坡 Gamma 累积频率曲线形状参数 $\alpha=3.035$ 、尺度参数 $\beta=14.609$,分别落入 95%置信区间 $[1.919,4.801]$ 和 $[8.874,24.051]$.

计算结果表明,不同地貌类型区黄土滑坡的平均规模径分别为:子洲县为 45.45 m,宝塔区为 67.44 m,洛川县为 44.34 m.由此可见,无论是黄土滑坡发生数量还是发生规模,以塬为主的宝塔区都

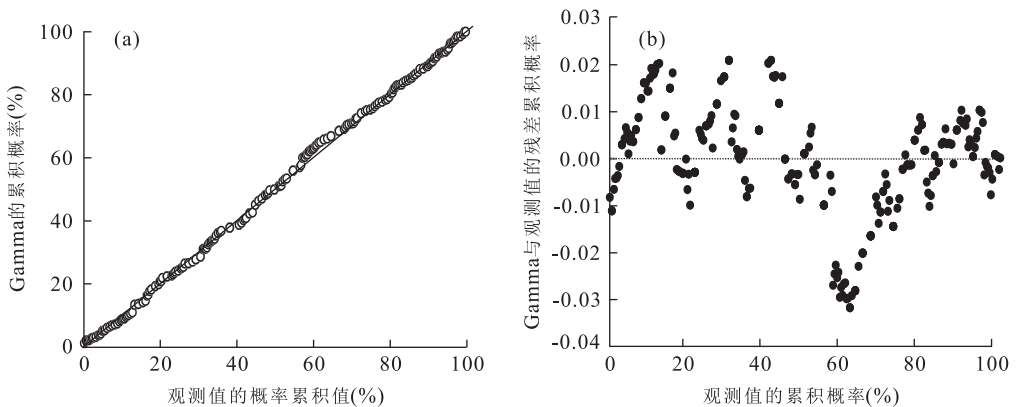


图 5 宝塔区(黄土塬区)黄土滑坡三轴几何平均径 Gamma $P-P$ 散点图(a)和无趋势 Gamma $P-P$ 散点图(b)

Fig.5 Gamma $P-P$ plot (a) and detrended Gamma $P-P$ plot (b) of landslide diameter in Baota District

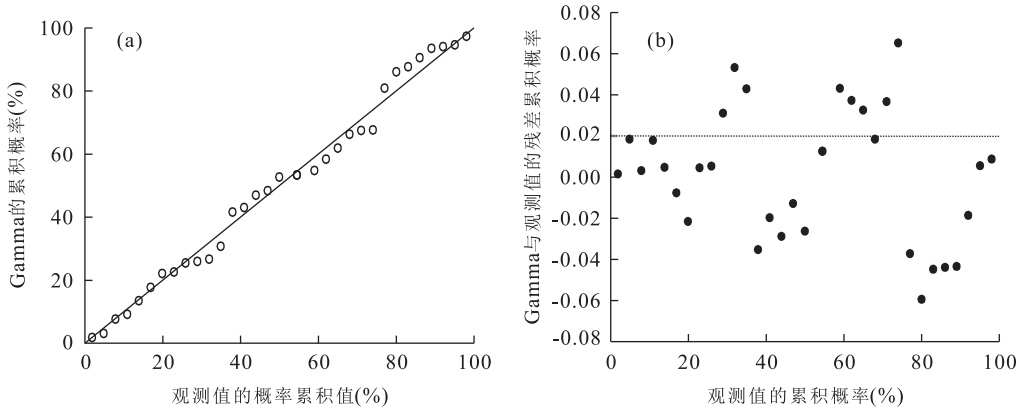


图 6 洛川县(黄土塬区)黄土滑坡三轴几何平均径 Gamma P-P 散点图(a)和无趋势 Gamma P-P 散点图(b)
Fig.6 Gamma P-P plot (a) and detrended Gamma P-P plot (b) of landslide diameter in Luochuan County

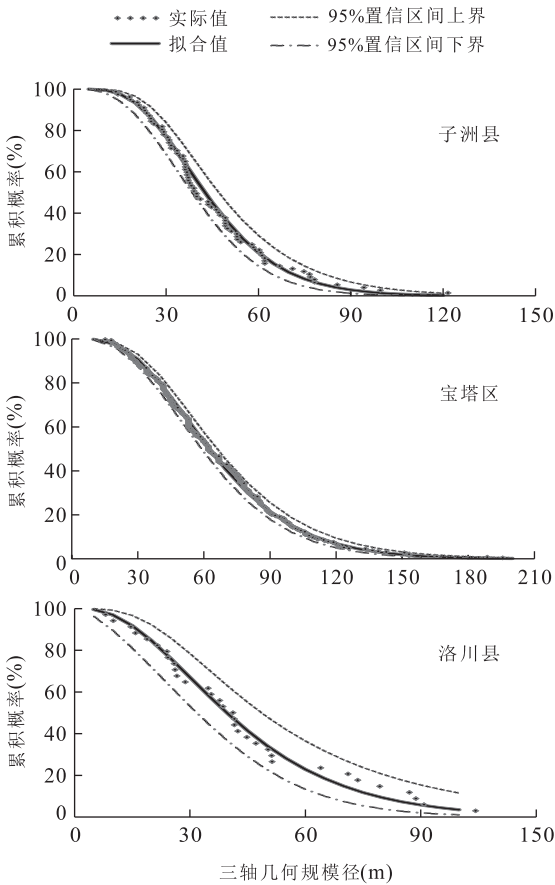


图 7 基于 Gamma 分布函数的黄土滑坡规模径频率分布拟合
Fig.7 Distribution fitting of loess landslide scale based on Gamma function

土塬区滑坡规模变异或离散程度最大,而黄土峁区滑坡规模变异或离散程度最小,黄土梁区变异或离散程度居中;这说明黄土地貌在由塬向峁区的演变过程中,黄土滑坡规模变异或离散程度逐渐减小.偏度(skewness)是统计数据分布非对称程度的数字特征.计算结果表明,黄土高原不同地貌类型区黄土滑坡的偏度系数分别为:子洲县为1.16、宝塔区为0.90和洛川县为0.76.在概率密度曲线上表现为,黄土滑坡概率密度曲线都呈右偏态,数据位于均值右边的比位于左边的少,直观表现为右边的尾部相对于左边的尾部要长;且偏度系数越大,右偏越严重.

由上述曲线可以估算任意大于或等于某一规模径黄土滑坡发生概率,图 8 显示,以梁为主的宝塔区黄土滑坡三轴几何平均规模径在任一累积频率上都大于其他两个县.对比分析黄土峁区子洲县和黄土塬区洛川县可知,累积频率<35%时,黄土塬区洛川县黄土滑坡三轴几何平均规模径大于黄土峁区子洲县;而在累积频率>35%时则相反,黄土峁区子洲

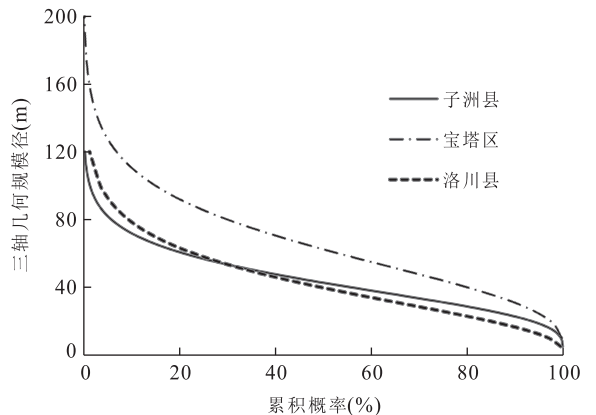


图 8 3 个县(区)黄土滑坡三轴几何规模径频率分布
Fig.8 Frequency distribution of scale diameter of loess landslides

是受滑坡灾害威胁最为严重的区域.变异系数 C_v 是衡量资料中各观测值变异或离散程度的一个统计量,它可以消除单位和(或)平均数不同对两个或多个资料变异程度比较的影响.计算结果表明,不同地貌类型区黄土滑坡的变异系数分别为:子洲县为0.46、宝塔区为0.48和洛川县为0.57.由此可知在黄

表1 不同累积频率下黄土滑坡发生规模径

Table 1 Scale diameter of loess landslides at different frequency

累积频率(%)	5	25	50	75	95
子洲县规模径(m)	82.03	56.78	42.63	31.07	18.52
宝塔区规模径(m)	127.66	85.53	62.39	43.88	24.48
洛川县规模径(m)	92.75	57.89	39.58	25.64	12.21

县黄土滑坡三轴几何平均规模径大于黄土塬区洛川县。表1分别显示累积频率在5%、25%、50%、75%和95%时,滑坡发生所对应的规模径。

3 结论与讨论

(1)在区域尺度上,滑坡可以看作在区域上广泛分布的“颗粒”,借鉴粒度分析理论和方法分析区域滑坡规模百分含量及其分布情况取得了很好的效果。特别是区域滑坡规模径概念的引入,相比于采用体积和面积分析和表达区域滑坡规模而言,具有易分析性和可拓展性。易分析性表现为采用规模径可以有效减缓规模频率($F-M$)曲线的偏转效应,可拓展性表现为可以借鉴土壤学等相关学科粒度分析理论研究区域滑坡问题。这对于促进学科交叉,推动粒度分析理论在区域滑坡规模频率分布分析中的应用具有探索性的作用。

(2)本文采用的三轴几何平均规模径是滑坡在空间范围内所占据的线形尺寸,是滑坡几何性质的一维表示。直方图分析表明洛川县和子洲县黄土滑坡三轴几何平均径为20~40 m所占比重最大,分别占到滑坡总数的33.33%和47.37%;宝塔区黄土滑坡三轴几何平均径为40~60 m所占比重最大,占到滑坡总数的27.30%。无论是黄土滑坡发生数量还是发生规模,以塬为主的宝塔区都是受滑坡灾害威胁最为严重的地方。

(3)由于地形地貌等诸多因素限制,从中等规模到大型滑坡之间的规模频率分布遵从幂指关系(power-law relation),并且随着规模的增大其发生频率急剧衰减。在小规模上,滑坡频率分布会出现偏转效应。在双对数坐标下,子洲县、宝塔区和洛川县黄土滑坡规模径分别在 <45 m、 <80 m和 <30 m处发生了偏转。

(4)Gamma分布函数具有很大的灵活性、在描述滑坡规模径分布方面具有广泛的适应性,能够很好地拟合黄土滑坡规模频率,且拟合模型的精度很高。通过Gamma分布函数可以预测不同概率下区

域滑坡规模径级。与Malamud *et al.* (2004)的三参数截断反伽马分布和Stark and Hovius (2001)的Double Pareto分布曲线相比,本文二参数Gamma分布函数形式简捷、拟合精度高,便于普及和推广应用。

(5)黄土塬区滑坡规模变异或离散程度最大,黄土峁区滑坡规模变异或离散程度最小,而黄土梁区变异或离散程度居中;这说明黄土地貌在由塬向峁区的演变过程中,黄土滑坡规模变异或离散程度逐渐减小。黄土高原依次出现的黄土塬—黄土残塬—黄土梁—黄土梁峁—黄土峁梁—黄土峁—黄土残丘等地貌类型,分别代表了黄土地貌几种发育模式下在发育阶段上的幼年期、少年期、青年期、壮年期、中年期、中老年期和老年期,这为进行黄土地貌“以空间换时间”的探索性实验提供了条件。综上所述,通过对不同地貌类型区黄土滑坡规模频率的研究,就可以知道不同地貌演变过程中黄土滑坡的规模频率分布状况。

References

- Bishop, C.M., 2006. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, New York.
- Brardinoni, F., Church, M., 2004. Representing the Landslide Magnitude-Frequency Relation: Capilano River Basin, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(1): 115–124. doi:10.1002/esp.1029
- Brunetti, M. T., Guzzetti, F., Rossi, M., 2009. Probability Distributions of Landslide Volumes. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 16(2): 179–188. doi:10.5194/npg-16-179-2009
- Chaytor, J.D., ten Brink, U.S., Solow, A.R., et al., 2009. Size Distribution of Submarine Landslides along the US Atlantic Margin. *Marine Geology*, 264(1–2): 16–27. doi:10.1016/j.margeo.2008.08.007
- Corominas, J., Moya, J., 2010. Contribution of Dendrochronology to the Determination of Magnitude-Frequency Relationships for Landslides. *Geomorphology*, 124(3–4): 137–149. doi:10.1016/j.geomorph.2010.09.001
- Dai, F.C., Lee, C.F., 2001. Frequency-Volume Relation and Prediction of Rainfall-Induced Landslides. *Engineering Geology*, 59(3–4): 253–266. doi:10.1016/S0013-7952(00)00077-6
- Dai, F.C., Xu, C., Yao, X., et al., 2011. Spatial Distribution of Landslides Triggered by the 2008 M_s 8.0 Wenchuan Earthquake, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4): 883–895. doi:10.1016/j.jseaes.2010.04.010
- Florsheim, J.L., Nichols, A., 2013. Landslide Area Probability

- Density Function Statistics to Assess Historical Landslide Magnitude and Frequency in Coastal California. *Catena*, 109:129–138. doi:10.1016/j.catena.2013.04.005
- Frattini, P., Crosta, G., B., 2013. The Role of Material Properties and Landscape Morphology on Landslide Size Distributions. *Earth and Planetary Science Letters*, 361: 310–319. doi:10.1016/j.epsl.2012.10.029
- Goswami, R., Mitchell, N. C., Brocklehurst, S. H., 2011. Distribution and Causes of Landslides in the Eastern Peloritani of NE Sicily and Western Aspromonte of SW Calabria, Italy. *Geomorphology*, 132(3–4): 111–122. doi:10.1016/j.geomorph.2011.04.036
- Guthrie, R. H., Evans, S. G., 2004. Analysis of Landslide Frequencies and Characteristics in a Natural System, Coastal British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(11): 1321–1339. doi:10.1002/esp.1095
- Hungr, O., McDougall, S., Wise, M., et al., 2008. Magnitude-Frequency Relationships of Debris Flows and Debris Avalanches in Relation to Slope Relief. *Geomorphology*, 96(3–4): 355–365. doi:10.1016/j.geomorph.2007.03.020
- Lei, X. Y., 1999. Geological Disasters on the Loess Plateau and Human Activities. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, T. L., Long, J. H., Li, X. S., 2007. Types of Loess Landslides and Methods for Their Movement Forecast. *Journal of Engineering Geology*, 15(4): 500–505 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. M., Shi, Y. C., 2006. Characteristics and Influential Factors of Different Types of Landslide in Loess Area. *Northwestern Seismological Journal*, 28(4): 360–363 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Y., He, S. M., He, J. C., 2014. Effect of Rainfall Patterns on Stability of Shallow Landslide. *Earth Science*, 39(9): 1357–1363 (in Chinese with English abstract).
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., et al., 2004. Landslide Inventories and Their Statistical Properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6): 687–711. doi:10.1002/esp.1064
- Qiu, H. J., Cao, M. M., Liu, W., 2013. Power-Law Correlation of Landslides: A Case of Ningqiang County. *Geological Science and Technology Information*, 32(3): 183–187 (in Chinese with English abstract).
- Stark, C. P., Hovius, N., 2001. The Characterization of Landslide Size Distributions. *Geophysical Research Letters*, 28(6): 1091–1094. doi:10.1029/2000GL008527
- van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Govers, G., et al., 2007. Characteristics of the Size Distribution of Recent and Historical Landslides in a Populated Hilly Region. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(3–4): 588–603. doi:10.1016/j.epsl.2007.01.040
- Wen, B. P., Li, Y., Wang, X. L., et al., 1997. Prediction and Forecast of Typical Landslide in the Loess Area and Its Reduction Countermeasures. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wu, Y. P., Zhang, Q. X., Tang, H. M., et al., 2014. Landslide Hazard Warning Based on Effective Rainfall Intensity. *Earth Science*, 39(7): 889–895 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L., Dai, F. C., Kuang, G. L., et al., 2009. Analysis of Some Special Engineering-Geological Problems of Loess Landslide. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 31(2): 287–293 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L., Dai, F. C., Min, H., 2008. Research Progress and Some Thoughts on Loess Landslides. *Advances in Earth Science*, 23(3): 236–242 (in Chinese with English abstract).
- Yao, L. K., Huang, Y. D., Yang, Q. H., 2010. The Self-Organized Criticality of Landslides Triggered by Earthquake. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 42(5): 33–43 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 雷祥义, 1999. 黄土高原地质灾害与人类活动. 北京: 地质出版社.
- 李同录, 龙建辉, 李新生, 2007. 黄土滑坡发育类型及其空间预测方法. *工程地质学报*, 15(4): 500–505.
- 刘红玫, 石玉成, 2006. 黄土地区不同类型滑坡的特征及影响因素. *西北地震学报*, 28(4): 360–363.
- 罗渝, 何思明, 何尽川, 等, 2014. 降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响. *地球科学*, 39(9): 1357–1363.
- 邱海军, 曹明明, 刘闻, 2013. 地质灾害的幂律相依性: 以宁强县为例. *地质科技情报*. 2013, 32(3): 183–187.
- 文宝萍, 李媛, 王兴林, 等, 1997. 黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究. 北京: 地质出版社.
- 吴益平, 张秋霞, 唐辉明, 等, 2014. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警. *地球科学*, 39(7): 889–895.
- 许领, 戴福初, 邝国麟, 等, 2009. 黄土滑坡典型工程地质问题分析. *岩土工程学报*, 31(2): 287–293.
- 许领, 戴福初, 闵弘, 2008. 黄土滑坡研究现状与设想. *地球科学进展*, 23(3): 236–242.
- 姚令侃, 黄艺丹, 杨庆华, 2010. 地震触发崩塌滑坡自组织临界性研究. *四川大学学报(工程科学版)*, 42(5): 33–43.