

引用格式:Zhang Hankui, Yu Le. A New Quantitative Description Method for Slope Position and Its Relationship with Landslides[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(4): 609-615. [张汉奎, 俞乐. 一种新的坡位定量描述方法及其与滑坡发生的关系[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(4): 609-615.]

一种新的坡位定量描述方法及其与滑坡发生的关系

张汉奎¹, 俞乐²

(1. 香港中文大学地理与资源管理学系, 香港;

2 清华大学地球系统科学研究中心, 北京 100084)

摘要:滑坡发生与地形因子的关系是区域滑坡静态规律研究的重点,但以往的研究多注重考虑其与反映几何形态的基本地形属性因子(几何形态属性因子)之间的关系,如坡度和坡向等。首先提出一种新的基于子流域内相对位置定量描述坡位(相对位置因子)的方法,并以温州地区瓯江流域1990~2001年发生的滑坡为研究对象,使用证据权法对比滑坡发生与两种不同类型地形因子之间的关系。结果表明,相对位置因子与滑坡发生的相关性大于滑坡危险性评价经常使用的几何形态属性因子;并且滑坡大多发生在定量坡位值较低的区域,这些地区处在下游,遭受流水侵蚀的强度更大、频率更高。

关键词:定量坡位;流域相对高程;滑坡;证据权

中图分类号:P 931;P 208.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2012)04-0609-07

1 引言

在对区域滑坡静态规律的研究中,作为最基本的自然地理要素的地形因子一直是研究的重点,其中坡度和坡向等是斜坡稳定性分析中最常用的地形因子^[1-3],也有一些学者研究单个地形因子与滑坡发生的关系,Mark等^[4]研究了浅层滑坡频度与地形的关系,结果显示陡峭地形与滑坡具有很好的统计相关性;Brabb^[5]认为地质/土壤和坡度是影响滑坡稳定性的主要因素;Zhou等^[6]使用统计的方法研究香港大屿山地区滑坡和各种因子之间的关系,地形因子采用坡度和坡向,结果显示25~35°坡度区域是滑坡敏感区域;王爱华等^[7]亦分析了不同地形因子与滑坡的相关性。在这些单因子分析多注重与基于几何形态属性信息的地形因子(几何形态属性因子)之间的关系,不同地区不同种类的滑坡与各种因子之间的关系并不相同。本文以温州地区瓯江流域为研究区域,采用相关性评价证据权法^[8],研究对比几何形态属性因子基于流域内相对位置信息的因子

(相对位置因子)与滑坡发生的相关性,为以后预测滑坡奠定基础。其中,几何形态属性因子使用坡度和坡向为例,相对位置因子使用流域相对高程HAND(Height Above the Nearest Drainage)^[9]和定量坡位为例。

坡位的描述通常有两种方法,即几何形态属性法^[10-11]和相对位置法^[12],也有学者结合两种类型信息进行坡位渐变信息模糊推理来描述^[13-14]。本文提出一种基于流域相对高程定量描述坡位的方法,该方法首先提取出流域单元,然后在流域单元内定量描述坡位,是一种基于相对位置因子的描述方法。

2 坡位的定量描述方法和实现

本文的坡位定量表述方法以流域单元中的流域相对高程为基础。流域相对高程是流域单元内每个点和该点沿地表径流方向流入河道点之间的高程差,将实际的地面高程调整为流域内的相对河道的高程,它的大小体现了每个点的排水重心潜力。例如,尽管处在河道上的不同点之间也存在高程差,属

于河道上的所有点的流域相对高程是零,即排水网络内部之间的高程差被忽视。坡位的定量描述值计算首先需要计算流域相对高程,然后除以该流域内的最大高程差,即最大可能的流域相对高程。新的定量坡位描述值的计算分为 5 个步骤(图 1)。

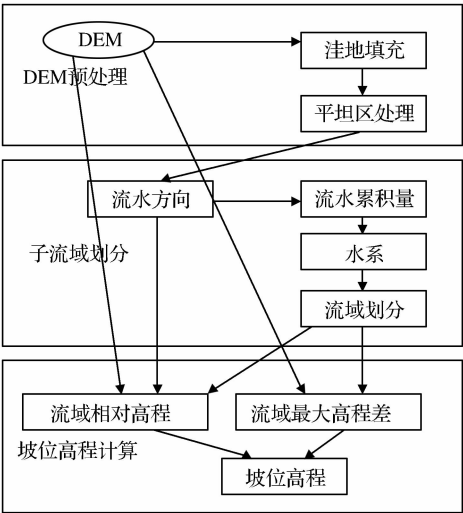


图 1 定量坡位值的计算流程

Fig. 1 The flow of the calculating quantification of slope positions

第一步,对 DEM 进行洼地填充和平坦区域预处理,本文采用 Jensen 等^[15]提出的方法进行洼地填充。对于 DEM 原有的或经填洼处理得到的平坦区域应用“burn-in”算法^[16]。第二步,采用 D8 算法^[17]确定 DEM 中每一个网格单元的水流方向。第三步,数字河网的提取。给定一个集水面积阈值,凡是集水面积超过该阈值的网格,均为河网内的单元,将这些网格单元连接后形成流域的河网。第四步,计算流域相对高程。根据流向计算每个栅格点和它的河道汇水点之间的高程差,计算时使用原始 DEM 数据,而不是经过洼地填充后的 DEM 数据。第五步,计算坡位的定量描述值,子流域内相对高程和最大高程差的比值,即为坡位的定量描述。

本研究中流域相对高程和坡位定量描述值计算所用的各种算法均以 ArcInfo 软件作为 GIS 平台开发实现,包括 Model Builder 和 ArcEngine 二次开发技术。

3 证据权法

滑坡危险度评价中的方法有专家打分法^[18]、多元回归法^[19]、聚类分析法^[20]、信息量预测法^[21]、证据权法^[8]和模糊综合评判法等^[22]。其中证据权法可以较好地避免主观评价因素的选择,而且可以描

述单个因子与滑坡发生的相关关系,本文使用证据权重法来比较不同的地形因子和滑坡发生的关系。

证据权重法是由加拿大数学地质学家 Agterberg 提出的一种基于 GIS 的空间分析模型,可以用于滑坡危险度分区定量评价方面^[23]。证据权模型可以给出二值证据图层和点对象关系密切程度的一个度量标准(权重)。当模型应用于滑坡危险度分区,点对象就是滑坡(点),证据图层就是对滑坡发育有利的地质和地形地貌等专题图件。证据层一般都网格化为不连续的区域(一般为二值变量)。1 代表证据存在,0 代表不存在,这样使得证据层和滑坡(点)空间关系更加明确。

假设研究区被划分成面积相等的 T 个单元,其中有 D 个单元为有滑坡单元, \bar{D} 个单元为无滑坡单元; B 为证据因子存在区的单元数; \bar{B} 为证据因子不存在区的单元数; w^+ 和 w^- 分别为证据因子存在区和不存在区的权重值,对于原始数据缺失区域,其权重值为 0。对于任意一个证据因子,其权重定义为:

$$w^+ = \ln \left\{ \frac{P(B/D)}{P(\bar{B}/D)} \right\}$$
$$w^- = \ln \left\{ \frac{P(\bar{B}/D)}{P(B/D)} \right\}$$

(1)

证据层和滑坡点正相关表示为 $w^+ > 0, w^- < 0$, 负相关表示为 $w^+ < 0, w^- > 0$ 。因此用 $C = w^+ - w^-$ 表示证据因子与滑坡存在的相关程度。

4 实验结果和分析

4.1 研究区概况

本次研究选取温州地区瓯江流域 1990~2001 年滑坡灾害发生的统计数据^[24]研究滑坡发生和地形因子的关系,10 a 内该流域滑坡共发生 177 次。浙江省滑坡占全省地质灾害的 80% 以上^[25],温州地区地处浙江省东南部,其中山地面积占 78.12%,山区河流深切,相对高差大,坡面稳定性差。组成山体的基岩以侏罗系火山岩及燕山期侵入岩为主,其他为少量白垩系陆相砂砾岩,容易风化。河谷和缓坡多被开垦成梯田或居民建设用地,受人类活动影响较大。并且地处沿海,台风暴雨多,集中降雨量大。以上条件决定了温州地区滑坡的易发性及多发性^[26]。

4.2 实验结果和分析

本文采用 90 m 分辨率 DEM(SRTM)进行流域分割和流域相对高程(HAND)计算,流域分割时不同的汇水面积阈值得到不同的排水网络。流域空间

离散程度(子流域的数目)如何确定,一直是数字水文模型中的一个重要课题^[27],Bathurst^[27]指出流域划分的子流域单元面积不应超过流域总面积的 1%。本文根据实验,汇水面积阈值设置为 2 000 个像素,即 16.2 km²,共划分出 704 个小流域,平均每个小流域占总流域的面积为 1/704,满足 Bathurst 指出的小流域面积小于总流域 1%的要求。计算出 HAND 的取值范围为 0~1 166 m,将它分为 10 个级别,为了平衡各个级别面积,前 9 个级别为间隔 100 m,将剩下的未分类的均归为第 10 个级别。落在 HAND 大于 600 m 区域的滑坡个数为 0,不计算其证据权因子。根据坡位定量描述的模型计算出坡位定量值,取值范围为 0~1,同样将坡位等分为 10 个级别,计算每个级别的证据权因子。地面坡度的取值范围为 0~90°,地面坡向的取值范围是 0~360°,均等分为 10 个级别计算证据权因子,其中处在坡度大于 63°区域上的滑坡个数为 0,不计算其证据权因子。滑坡分布与不同的地形因子相关关系图如图 2~5 所示,其中左图为全图,右图是发生滑

坡较多的局部地区的放大图,图中度量(坡度和相对高程等)被划分成 10 个等级(坡向为 9 个等级),等级的划分依据与计算证据权因子时等级的划分标准一致,每一个等级采用同一种颜色来表示;它们的证据权因子评价结果如表 1~4 所示。

从 4 幅滑坡和 4 种地形因子的位置关系图中可以看出,滑坡与定量坡位值为 0~0.1 证据层时的相关性最强,滑坡多分布在定量坡位第一级(0~0.1)和第二级(0.1~0.2)分级交界的地方;而与坡度和坡向的相关性比较弱,没有明显的规律。4 个表中 C 表示证据因子与滑坡存在的相关程度,C 越大相关性越强。由表 3 和表 4 可以得出不同坡向带的滑坡分布比较随机,然而坡度在小于 45°区域滑坡发生的个数较大于坡度大于 45°的区域。从表 1 和表 2 中可以看出,流域相对高程值取 0~100 是 C 值最大,为 0.9412,并且其他等级的 C 值都比较小,多为负值;定量坡位值的取值范围为 0~0.1 时,滑坡的发生概率比较大,并且随着定量坡位值的增加,定量坡位值与滑坡发生呈现负相关趋势。

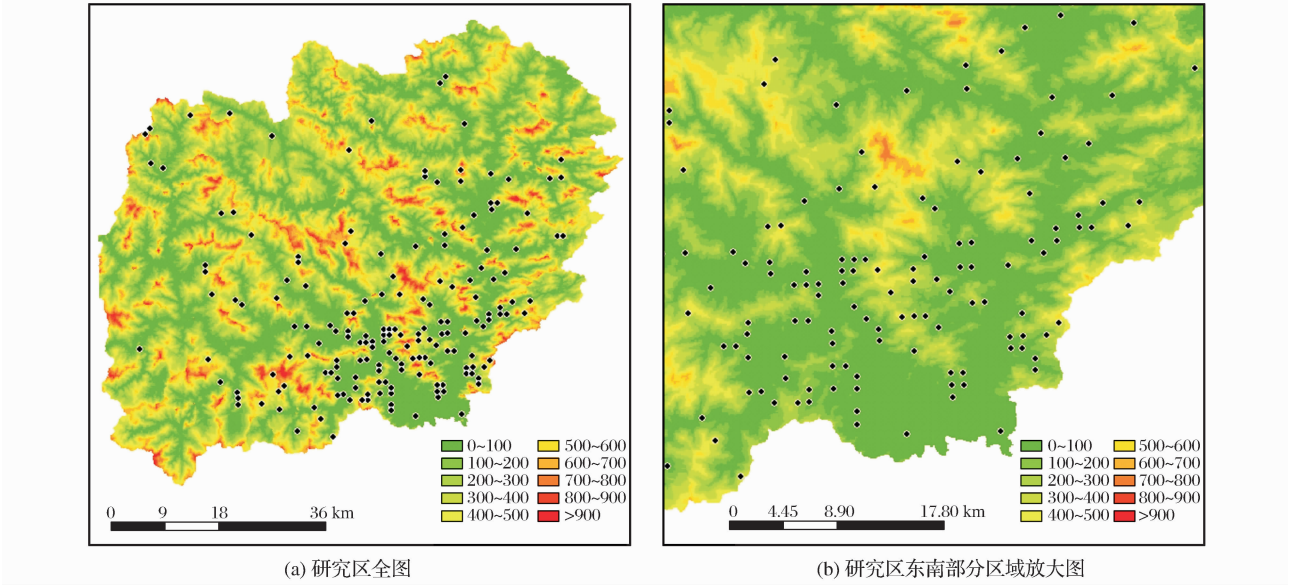


图 2 流域相对高程和滑坡分布

Fig. 2 The distribution relationship between HAND and landslides

表 1 流域相对高程和滑坡发生的证据分析结果

Table 1 The weights of evidence results of relationship between HAND and landslides

HAND/m	0~100	100~200	200~300	300~400	400~500	500~600
滑坡个数	97	43	21	9	3	4
w^+	0.5344	0.0391	-0.5106	-0.9645	-1.4773	-0.2769
w^-	-0.4068	-0.0122	0.0940	0.0910	0.0610	0.0070
C	0.9412	0.0513	-0.6046	-1.0555	-1.5374	-0.2843

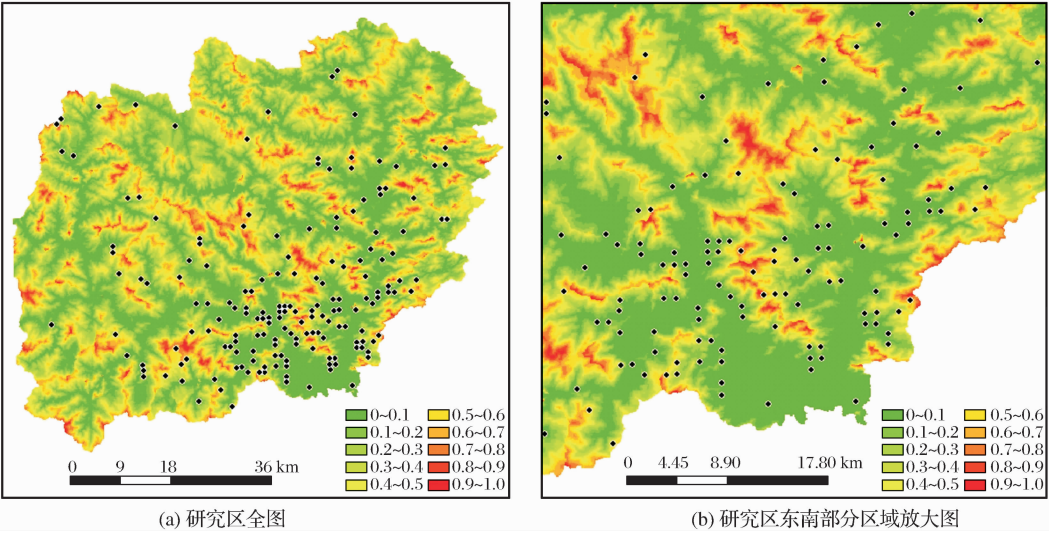


图 3 定量坡位值和滑坡分布

Fig. 3 The distribution relationship between quantitative slope position and landslides

表 2 定量坡位值和滑坡发生的证据分析结果

Table 2 The weights of evidence results of relationship between quantitative slope position and landslides

坡位值	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9
滑坡个数	82	27	25	13	13	9	2	5	1
w^+	0.6547	-0.0025	-0.1075	-0.6483	-0.4704	-0.5412	-1.5717	0.0235	-0.6946
w^-	-0.3361	0.0005	0.0192	0.0765	0.0497	0.0400	0.0454	-0.0007	0.0058
C	0.9908	-0.0029	-0.1267	-0.7248	-0.5202	-0.5811	-1.6171	0.0241	-0.7004

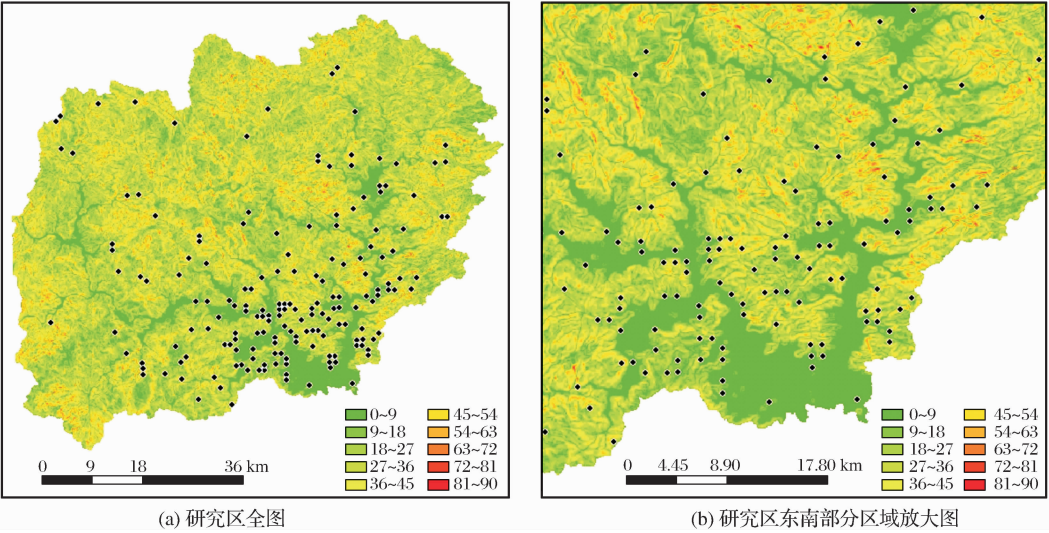


图 4 坡度和滑坡分布

Fig. 4 The distribution relationship between slope gradient and landslides

表 3 坡度和滑坡发生的证据分析结果

Table 3 The weights of evidence results of relationship between slope gradient and landslides

坡度值/°	0~9	10~18	19~27	28~36	37~45	46~54	55~63
滑坡个数	35	35	48	26	24	5	4
w^+	0.5884	0.3636	0.2858	-0.4473	-0.3311	-1.2547	-0.1683
w^-	-0.104	-0.0724	-0.0885	0.1022	0.0636	0.0757	0.0042
C	0.6924	0.4361	0.3743	-0.5494	-0.3947	-1.3303	-0.1726

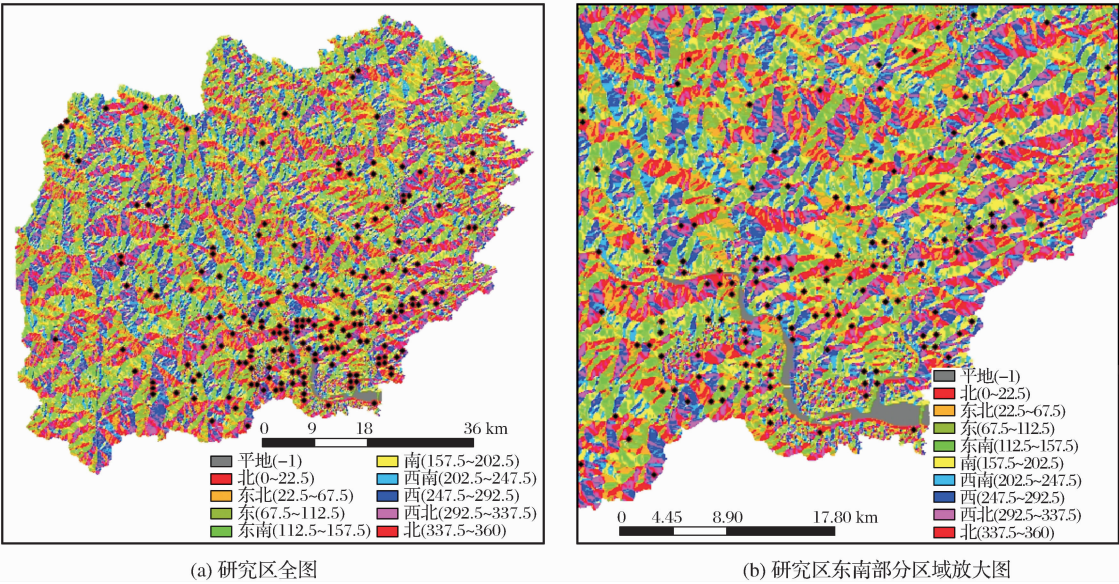


图 5 坡向和滑坡分布

Fig. 5 The distribution relationship between slope aspect and landslides

表 4 坡度和滑坡发生的证据分析结果

Table 4 The weights of evidence results of relationship between slope aspect and landslides									
坡向值/°	0~	22.5~	67.5~	112.5~	157.5~	202.5~	247.5~	292.5~	337.5~
	22.5	67.5	112.5	157.5	202.5	247.5	292.5	337.5	360
滑坡个数	13	19	21	27	23	27	16	20	11
w^+	-0.34	-0.0658	0.0275	0.01669	-0.09	0.2109	-0.1939	-0.0328	-0.0156
w^-	0.0197	0.0084	-0.0037	-0.0278	0.0145	-0.0343	0.0219	0.0011	0.0011
C	-0.3597	-0.0741	0.0312	0.1948	-0.1045	0.2452	-0.2158	-0.0372	-0.0167

相对位置地形因子与滑坡发生的相关性大于几何形态属性地形因子。滑坡多发生在定量坡位值比较小的区域,温州地区的滑坡多是暴雨诱发的滑坡,愈是靠近坡脚的区域,流水的侵蚀强度和频率越高,并且这些区域遭受人类活动的破坏更大,更容易发生滑坡。

5 结 语

本文提出一种基于流域单元定量描述坡位的方法,并探讨了温州地区瓯江流域滑坡发生和相对位置与几何形态属性地形因子的相关关系。定量坡位值的计算首先在大流域内将河谷网络提取出来,根据河谷网络划分子流域,然后分别在每个流域内计算各个点与该点的流域汇水点的高程差,作为该点在这种流域划分单元下的流域相对高程,最后除以小流域内的最大高程差,即是坡位的定量描述。并使用证据权法研究温州地区山体滑坡发生与不同级别坡位和坡度的关系,结果表明,在研究区内,反映区域相对位置信息的流域相对高程和定量坡位与滑

坡发生的相关性比滑坡危险性评价经常使用的坡度坡向等几何形态属性地形因子要大。这可能与温州地区的滑坡成因有关,温州的滑坡多为降雨性诱发,降雨导致水流侵蚀的急剧变化,因此,使用和水流侵蚀强度密切相关的坡位信息解释其与滑坡发生的关系。在其他类型的滑坡发生区域坡位信息和滑坡的相关性有待进一步研究和探讨。

参考文献(References):

[1] Dai F C, Lee C F. Landslide Characteristics and Slope Instability Modeling Using GIS, Lantau Island, Hong Kong[J]. Geomorphology, 2002, 42(3-4): 213-228.

[2] Ohlmacher G C, Davis J C. Using Multiple Logistic Regression and GIS Technology to Predict Landslide Hazard in Northeast Kansas, USA[J]. Engineering Geology, 2003, 69(3-4): 331-343.

[3] Lee S, Min K. Statistical Analysis of Landslide Susceptibility at Yongin, Korea[J]. Environmental Geology, 2001, 40(9): 1095-1113.

[4] Mark R K, Ellen S D. Statistical and Simulation Models for

- Mapping Debris Flow Hazard[C]//Carrara A, Guzzetti F eds. Geographical Information System in Assessing Natural Hazard. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1995: 93-106.
- [5] Brabb E. Innovation Approach to Landslide Hazard and Risk Mapping[C]//Proceedings of the Fourth International Symposium on Landslide. Toronto: Hazards Center Publication, 1984: 307-323.
- [6] Zhou C H, Lee C F, Li J, *et al.* On the Spatial Relationship between Landslides and Causative Factors on Lantau Island, Hong Kong[J]. *Geomorphology*, 2002, 43: 197-207.
- [7] Wang Aihua, Zhou Yuan, Yin Baishou. Study on Landslide Single Factors based on GIS[J]. *Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition)*, 2007, 24(2): 91-93. [王爱华, 周园, 殷百寿. 基于 GIS 的滑坡单因子分析研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2007, 24(2): 91-93.]
- [8] Agterberg F P, Bonham-carter G F, Cheng Q, *et al.* Weights of Evidence Modeling and Weighted Logistic Regression for Mineral Potential Mapping[C]//Davis J C, Herzfeld U C eds. *Computers in Geology, 25 Years of Progress*. Oxford: Oxford University Press, 1993: 13-32.
- [9] Renno C, Nobre A, Cuartas L, *et al.* HAND, a New Terrain Descriptor Using SRTM-DEM; Mapping Terra-firme Rainforest Environments in Amazonia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 3469-3481.
- [10] Pennock D J, Zebarth B J, De Jong E. Landform Classification and Soil Distribution in Hummocky Terrain, Saskatchewan, Canada[J]. *Geoderma*, 1987, 40(3-4): 297-315.
- [11] Tang Guo'an, Yang Weiyang, Yang Xi, *et al.* Some Key Points in Terrain Variables Deriving from DEMs[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2003, 28(1): 28-311. [汤国安, 杨玮莹, 杨昕, 等. 对 DEM 地形定量因子挖掘中若干问题的探讨[J]. *测绘科学*, 2003, 28(1): 28-311.]
- [12] Skidmore A. Terrain Position as Mapped from a Gridded Digital Elevation Model[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1990, 4(1): 33-491.
- [13] Schmidt J, Hewitt A E. Fuzzy Land Element Classification from DTMs based on Geometry and Terrain Position[J]. *Geoderma*, 2004, 121: 243-256.
- [14] Qin Chengzhi, Zhu Axing, Shi Xun, *et al.* Fuzzy Inference of Spatial Gradation of Slope Position[J]. *Geography Research*, 2007, 26(6): 1165-1174. [秦承志, 朱阿兴, 施迅, 等. 坡位渐变信息的模糊推理[J]. *地理研究*, 2007, 26(6): 1165-1174.]
- [15] Jenson S K, Domingue J O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54(11): 1593-1600.
- [16] Saunders W K, Maidment D R. A GIS Assessment of Non-point Source Pollution in the San Antonio-nueces Coastal Basin[M]. Austin: Center for Research in Water Resources, The University of Texas, 1996.
- [17] O'Callaghan J F, Mark D M. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data[J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1984, 28: 323-344.
- [18] Ding Cuiwei, Xue Xingqiao, Yang Qiang, *et al.* A Study of Geological Hazards Liability Zoning based on GIS in Lingtai County of Gansu Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(3): 32-34. [丁伟翠, 薛星桥, 杨强, 等. 基于 GIS 的甘肃省灵台县地质灾害易发性区划研究[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(3): 32-34.]
- [19] Ohlmacher G C, Davis J C. Using Multiple Logistic Regression and GIS Technology to Predict Landslide Hazard in Northeast Kansas, USA[J]. *Engineering Geology*, 2003, 69: 331-343.
- [20] Xia Yuanyou. A Hierarchical Weighted Clustering Method and Its Application in Predicting Landslide Stability[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1997, 6(3): 86-91. [夏元友. 系统加权聚类法及其在滑坡稳定性预测中的应用[J]. *自然灾害学报*, 1997, 6(3): 86-91.]
- [21] Zhu Liangfeng, Wu Xincai, Yin Kunlong. Risk Zonation of Landslide in China based on Information Content Model[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2004, 26(3): 52-56. [朱良峰, 吴信才, 殷坤龙, 等. 基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究[J]. *地球科学与环境学报*, 2004, 26(3): 52-56.]
- [22] Zhu Axing, Pei Tao, Qiao Jianping, *et al.* A Landslide Susceptibility Mapping Approach Using Expert Knowledge and Fuzzy Logic under GIS[J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(4): 1-12. [朱阿兴, 裴韬, 乔建平, 等. 基于专家知识的滑坡危险性模糊评估方法[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(4): 1-12.]
- [23] Wang Zhiwang, Li Ruiyou, Wang Xiangjia. Zonation of Landslide Hazards based on Weights of Evidence Model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(8): 1268-1273. [王志旺, 李瑞有, 王湘佳. 证据权法在滑坡危险度区划研究中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(8): 1268-1273.]
- [24] Li Changjiang. The Investigation and Research of Land and Resources of Zhejiang Province using Remote Sensing[M]. Beijing: Geological Publishing, 2004. [李长江. *浙江省国土资源遥感调查与综合研究*[M]. 北京: 地质出版社, 2004.]
- [25] Wang Shenfa, Wang Yuangao, Hu Zhenzhen. Actuality of Hill Sliding and Its Cause in the Mountainous Region of Zhejiang Province[J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(4): 373-376. [王深法, 王援高, 胡珍珍. 浙江山地滑坡现状及其成因[J]. *山地学报*, 2000, 18(4): 373-376.]
- [26] Zhang Zhansheng, Wang Haiqin, Wang Kun, *et al.* Analysis of Geological Hazard in Wenzhou, Zhejiang Province—Taking the Land Slide in Meichou Village as an Example[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2008, 19(4): 125-127. [张战胜, 王海芹, 王昆, 等. 浙江省温州山区滑坡地质灾害特征及治理对策分析——以梅澳坑村滑坡为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2008, 19(4): 125-127.]
- [27] Bathurst J C. Physically based Distributed Modeling of Up-land Catchment Using the Systems Hydrologique Europeen[J]. *Journal of Hydrology*, 1986, 87(1-2): 79-123.

A New Quantitative Description Method for Slope Position and Its Relationship with Landslides

Zhang Hankui¹, Yu Le²

(1. *Department of Geography and Resource Management,*

The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China;

2. Earth System Science Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Relationship between landslide and topographical factors is one of the focuses of study the law of regional landslide; however, previous research mostly focused on its relationship with factors reflected terrain geometry form (Geometry Attribute Factor). Generally, there are two kinds of methods for describing topographical factors. Taking the slope position as an example, and it can be depicted by classifying slope position according to geometry attribute factors; and it can also be depicted by some kind of index calculated according to regional relative location information (Relative Position Factors). This paper first proposes a new method to depict slope position quantitatively based on Height Above the Nearest Drainage (HAND). HAND is defined as the elevation difference between a point and corresponding outlet through the point which drop the water into the river. And the quantitative slope position is the ratio between the point's HAND value and maximum elevation difference within the sub basin. The another research is to examine the relationship between landslides and two different types of topographical factors named geometry attribute factors and relative position factors. The research area is located in Ou River in Wenzhou area and the landslides occurred during 1990-2001. The relationship is calculated by the weights of evidence method, which is a good candidate for calculating the landslides and some single topographical factor. The results show that higher correlation exists between relative position factors and landslide than geometry attribute factors which are common used in the risk evaluation of landslide, which indicate that the regional relative position information is more related to the landslide than the simple basic terrain geometry information, and most of the landslides occurred in relatively-low-HAND region in the watershed, which is suffering from water rushing with greater intensity and more frequency.

Key words: Slope position; Height above the Nearest Drainage; Landslide; Weight of evidence