

文章编号: 1008-2786-(2007)2-207-05

长江三峡库区云阳-巫山段斜坡坡度对 滑坡的贡献率

乔建平, 吴彩燕, 田宏岭

(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)

摘 要: 三峡库区滑坡发育与多种因素相关, 在它的内部因子中除了地层、斜坡高差和坡向等重要因素外, 斜坡的坡度是一个非常重要的条件。为了研究坡度与滑坡发育的关系, 借助于 GIS 技术, 利用贡献率法重点研究了三峡库区斜坡坡度对滑坡发育的影响, 并且定量地给出了二者的相关关系, 即坡度对滑坡发育的贡献。该方法是将坡度划分为若干区间, 分析每一区间对滑坡发育所起到的贡献作用, 并定量评价了其贡献率的大小。所得研究结果与实际情况较吻合, 为库区的滑坡防治规划提供了依据。

关键词: 三峡库区; 坡度; 滑坡; 贡献率

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A

三峡库区云阳-巫山段集中了库区 40% 的滑坡(据“中国地质环境信息网”), 通过作者分别对滑坡发育主要影响因素(地层岩性、高差、坡形)的贡献关系研究, 其相关性很强^[1-3]。在研究区滑坡其它孕育条件下相同的, 本文主要研究斜坡坡度与滑坡发育的关系。已有的研究对滑坡与坡度的单一关

系进行过统计分析^[4-8], 但对区域大范围斜坡坡度与滑坡发育的定量关系研究较少。所以难以定量预测区域斜坡坡度可能对滑坡发育产生的作用, 或潜在的危险性。本文中作者将坡度 0°~90°分为 9 类, 所对应的坡度与数值对应表如表 1。

表 1 坡度分类对照表
Table 1 Table of gradient classification

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9
$< 10^\circ$	$10^\circ \sim 20^\circ$	$20^\circ \sim 30^\circ$	$30^\circ \sim 40^\circ$	$40^\circ \sim 50^\circ$	$50^\circ \sim 60^\circ$	$60^\circ \sim 70^\circ$	$70^\circ \sim 80^\circ$	$> 80^\circ$

根据已有的滑坡数据库 CDM I(中科院成都山地所滑坡数据库), 结合 GIS 技术进行分析, 利用贡献率法将滑坡与坡度的关系进行量化:

坡度贡献率 = 各类坡度贡献指数 / 坡度贡献总指数 $\times 100\%$ (1)

贡献率分析法是针对研究区内各种坡度定量研究其在滑坡发育中所起的作用, 比较各类坡度对滑

坡发育的贡献程度。研究坡度对滑坡的贡献率, 可以为滑坡危险度区划提供可靠的参数依据。

1 坡度信息

1.1 数据来源

CDM I 滑坡数据库存储了三峡库区云阳-巫山

收稿日期 (Received date): 2006-05-09; 改回日期 (Accepted): 2007-03-08.
基金项目 (Foundation item): 中科院三期重要方向创新项目 KJJC3-SW-L1-6 资助 [Supported by the important item of the International Science and Technology Cooperation of Science and Technology of China (2004DFB01100), the innovative item of Chinese Academy of Science (KJJC3-SW-L1-6).]
作者简介 (Biography): 乔建平, 男 (1953-), 研究员, 博导, 成都人。主要研究方向: 滑坡危险度区划、区域滑坡规律、滑坡机理。 [Qiao Jianping (1953-), male professor is from Chengdu of Sichuan province, mainly engaging in landslide hazard assessment, landslide mechanism and distribution, earthquake landslide.]
© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

段长 100 km, 宽 40 km 范围内的 205 个滑坡样本点的数据, 每个滑坡的属性数据都可以从该数据库中获取。本文所需要的坡度数据源自该数据库。采用的 DEM、DRE 基础资料均为国家测绘局提供的滑坡发生前原始地形数据。

1.2 坡度数据图层

为了得出研究区内坡度与滑坡发育的关系, 仅有已经发生过的 205 个滑坡的坡度数据是不够的, 还需要整个研究区内的坡度数据, 只有把二者结合起来, 才能够说明研究区内坡度与滑坡发育之间的相关性。获取研究区的坡度数据是借助于 GIS 技术得到的, 其方法流程如图 1。

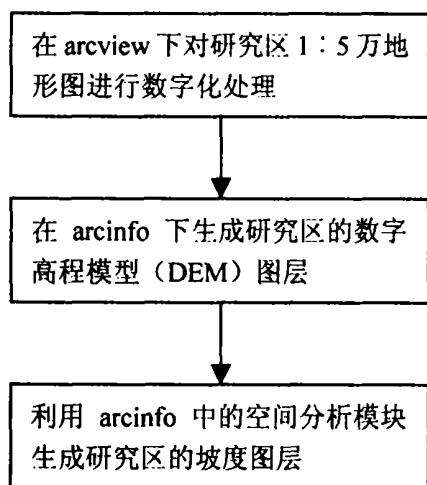


图 1 生成坡度图层的流程图

Fig.1 Flow chart of building slope gradient layer

所得到的坡度图层是精度为 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 的栅格图层, 整个研究区共采集 700 多万个象元的坡度信息。

2 地形坡度对滑坡的贡献 (G_i)

2.1 面积贡献 (G_1)

利用坡度图层, 根据表 1 将坡度分为 9 个类别, 由各个区间坡度分布的直方图进行计算, 可以得出各类坡度面积对研究区斜坡总面积的贡献关系, 即各区间坡度在研究区中对滑坡发育可能做出的贡献 (图 2)

$$G_1 = \alpha_i(s) S \quad (2)$$

式中 G_1 为坡度面积贡献、 $\alpha_i(s)$ 为各类坡度面积、 S 为研究区斜坡总面积。

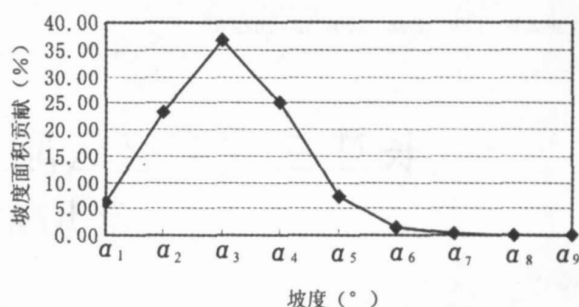


图 2 各坡度面积贡献图

Fig.2 Diagram of contributing rate of the area of each slope gradient

各斜坡坡度面积对区域斜坡总面积的贡献率 G_1 的大小以下列不等式表示

$$G_1 \Rightarrow \alpha_3 > \alpha_4 > \alpha_2 > \alpha_5 > \alpha_1 > \alpha_6 > \alpha_7 > \alpha_8 > \alpha_9 \quad (3)$$

式中 $\alpha_1 \dots \alpha_9$ 分别表示各类坡度面积对斜坡总面积的贡献值。

2.2 滑坡数量贡献 (G_2)

根据已有的 205 个滑坡样本点, 分别对 9 类坡度 $\alpha_1 \dots \alpha_9$ 发生的滑坡数量进行统计, 计算各种坡度对滑坡数量的贡献关系 (图 3)

$$G_2 = \alpha_i(n) N \quad (4)$$

式中 G_2 为坡度对滑坡数量贡献、 $\alpha_i(n)$ 为各类坡度发生的滑坡数量、 N 为研究区发生的滑坡总数。

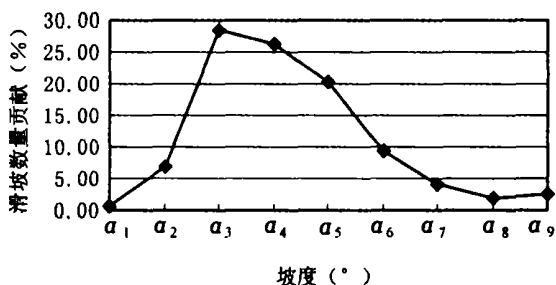


图 3 坡度对滑坡数量贡献关系图

Fig.3 Diagram of contributing rate of slope gradient to landslide

各坡度对滑坡数量贡献 G_2 的大小以下列不等式表示

$$G_2 \Rightarrow \alpha_3 > \alpha_4 > \alpha_5 > \alpha_6 > \alpha_2 > \alpha_7 > \alpha_9 > \alpha_8 > \alpha_1 \quad (5)$$

式中 $\alpha_1 \dots \alpha_9$ 分别表示各类坡度对滑坡数量的贡献值。

2.3 滑坡规模贡献 (G_3)

根据滑坡体积分布的不同状况, 可以分析研究区不同类别坡度中产生滑坡规模的现象, 分别对 9 个坡度区间 $\alpha_1 \dots \alpha_9$ 发生的滑坡体积进行统计, 计算出各坡度对滑坡规模的贡献 (图 4)

$$G_3=\alpha_i(v) N \tag{6}$$

式中 G_3 为坡度对滑坡规模贡献、 $\alpha_i(v)$ 为各区间坡度发生的滑坡体积、 V 为滑坡总体积。

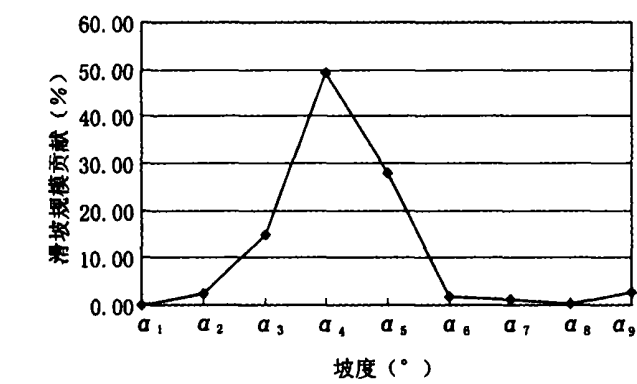


图 4 各坡度滑坡规模贡献图
Fig.4 Diagram of contributing rate to the volume of landslides of each gradient

各坡度对滑坡规模的贡献 G_3 的大小以下列不等式表示

$$G_3 \Rightarrow \alpha_4 > \alpha_5 > \alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_6 > \alpha_7 > \alpha_9 > \alpha_8 > \alpha_1 \tag{7}$$

式中 $\alpha_1 \cdots \alpha_9$ 分别表示各类坡度对滑坡规模的贡献值。

3 坡度综合贡献率 (G_0)

经过以上坡度与滑坡的不同贡献类型统计, 获得式 (2) ~ (7) 的贡献关系, 采用迭加组合评价方法可以得到各坡度对滑坡的综合贡献率。

3.1 赋值方法

将式 (3)、(5)、(7) 按排列顺序自高到低依次进行赋值, 赋值间隔为 1, 可以得到赋值表 (表 2)。

Table 2 Evaluating table of different contributing rate type of gradient									
贡献类型	赋值区间								
G_1	(α_3)	(α_4)	(α_2)	(α_5)	(α_1)	(α_6)	(α_7)	(α_8)	(α_9)
	9	8	7	6	5	4	3	2	1
G_2	(α_3)	(α_4)	(α_5)	(α_6)	(α_2)	(α_7)	(α_9)	(α_8)	(α_1)
	9	8	7	6	5	4	3	2	1
G_3	(α_4)	(α_5)	(α_3)	(α_2)	(α_6)	(α_7)	(α_9)	(α_8)	(α_1)
	9	8	7	6	5	4	3	2	1

3.2 迭加统计

采用求均值方法对表 2 中 $G_1 \sim G_3$ 的同一类坡度贡献值进行迭加统计, 得出综合贡献指数

$$G(\alpha_i)=\frac{1}{n}\sum_1^3G(\alpha)_i$$

$$=\frac{1}{n}[G(\alpha)_1+G(\alpha)_2+G(\alpha)_3] \tag{8}$$

式中 G 为每一类坡度的综合贡献指数、 α 为坡度符号、 $G(\alpha)_i$ 为坡度不同贡献类型指数、 n 为坡度贡献类型总数。利用式 (8) 计算每类坡度的综合贡献指数, 如:

$$\begin{aligned} G(\alpha_6) &= \frac{1}{n} \sum_1^3 G(\alpha)_i \\ &= \frac{1}{n} [G(\alpha)_1 + G(\alpha)_2 + G(\alpha)_3] \\ &= \frac{1}{3} [4 + 6 + 5] \\ &= 5 \end{aligned}$$

依此类推, 对参加统计的 9 类坡度的贡献指数进行计算得到综合贡献指数分别为:

$$\begin{aligned} G(\alpha_1) &= 7 \beta \approx 2.3 \quad G(\alpha_2) = 6 \quad G(\alpha_3) = 25 \beta \approx 8.3 \\ G(\alpha_4) &= 25 \beta \approx 8.3 \quad G(\alpha_5) = 7 \quad G(\alpha_6) = 5 \quad G(\alpha_7) = 11 \beta \approx 3.7 \\ G(\alpha_8) &= 2 \quad G(\alpha_9) = 7 \beta \approx 2.3 \end{aligned}$$

不同坡度的综合贡献指数按大小排列为下列不等式

$$G(\alpha_i) \Rightarrow \alpha_3 = \alpha_4 > \alpha_5 > \alpha_2 > \alpha_6 > \alpha_7 > \alpha_1 = \alpha_9 > \alpha_8 \tag{9}$$

3.3 贡献率分析

得到研究区各类坡度的综合贡献指数后, 可以对各坡度对滑坡发育做出的贡献率进行计算, 根据贡献率的定义:

$$\text{贡献率}(\%) = \frac{\text{贡献量}(\text{指数})}{\text{总贡献量}(\text{指数})} \times 100\%$$

即

$$G_0(\alpha_i) = G(\alpha_i) M \times 100\% \tag{10}$$

式中 $G_0(\alpha)_i$ 为各类坡度贡献率、 $G(\alpha)_i$ 为各类坡

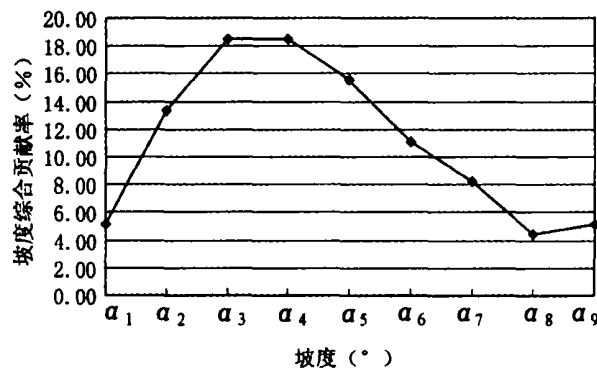


图 5 各坡度对滑坡发育的综合贡献率分布图
Fig.5 Distribution graph of the integrative contributing rate of each gradient

度贡献指数、 M 为坡度贡献指数总数, $M = \sum_1^9 G(\alpha_i)$ 。利用式 (10) 计算出各坡度贡献率 (图 5), 图中可以看出贡献率的分布规律。

为了分析各坡度在滑坡发育中的贡献率程度, 对它们用等距法划分为高、中、低三个等级, 求出相应的等距为

$$d = \frac{G_0(\alpha_i)_{\max} - G_0(\alpha_i)_{\min}}{3}$$

(11)

将图 5 中贡献率值代入 (11) 式, 求出 $d = 4.68\%$, 三级划分区间为

$$\begin{aligned} x_1 &= (b_1 \sim b_2) \\ x_2 &= (b_2 \sim b_3) \\ x_3 &= (b_3 \sim b_4) \end{aligned}$$

(12)

式中 x_1 为高贡献率、 x_2 为中贡献率、 x_3 为低贡献率; $b_1 = G_0(\alpha_i)_{\max}$, $b_2 = b_1 - d$, $b_3 = G_0(\alpha_i)_{\min} + d$, $b_4 = G_0(\alpha_i)_{\min}$ 。

将计算的贡献率数值代入 (12) 式, 得到

$$\begin{aligned} x_1 &= (18.49\% \sim 13.81\%) \\ x_2 &= (13.81\% \sim 9.13\%) \\ x_3 &= (9.13\% \sim 4.45\%) \end{aligned}$$

各坡度对滑坡发育做出的贡献率程度见表 3。

表 3 坡度贡献率程度评价表

Table 3 Evaluating table of contributing degree of gradient

坡度分类 (α_i)	贡献率 ($G_0(\alpha_i)$)	贡献程度 (DG_0)
$\alpha_3 (20^\circ \sim 30^\circ)$	18.49%	$DG_0(\alpha_i) = U$ 高
$\alpha_4 (30^\circ \sim 40^\circ)$	18.49%	
$\alpha_5 (40^\circ \sim 50^\circ)$	15.59%	
$\alpha_2 (10^\circ \sim 20^\circ)$	13.36%	$DG_0(\alpha_i) = M$ 中
$\alpha_6 (50^\circ \sim 60^\circ)$	11.14%	
$\alpha_7 (60^\circ \sim 70^\circ)$	8.24%	
$\alpha_1 (< 10^\circ)$	5.12%	$DG_0(\alpha_i) = L$ 低
$\alpha_9 (> 80^\circ)$	5.12%	
$\alpha_8 (70^\circ \sim 80^\circ)$	4.45%	

4 结论

1 研究区内滑坡主要发生在坡度为 $20^\circ \sim 50^\circ$ 的斜坡上, 其面积占研究区总面积的 68.87%, 发育滑坡 152 处, 占总数 (205) 的 74.88%, 发育的滑坡体积 $7.26 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总体积的 91.89%, 是区内滑坡发育的重要坡度区间; 坡度为 $10^\circ \sim 20^\circ$ 和 $50^\circ \sim 60^\circ$ 的斜坡对滑坡发育的贡献率中等; 其他坡度区间

的斜坡在研究区内发育的滑坡很少, 贡献率最低。
2 采用 GIS 技术和贡献率法研究斜坡坡度与滑坡发育的关系, 可以定量地分析出二者的相关性, 方法和结果都具有较高的可靠性。

参考文献 (References)

[1] Qiao Jian ping. A research into the contribution ratio of the strata factors to landslide development along the banks from YunYang to Wushan in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Lithological Soft Science and Engineering*, 2004, 23(17): 2920~2924 [乔建平. 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]

[2] Qiao Jian ping. The influence of relative elevation on landslide occurrence in Yunyang-Wushan section in the Three Gorges Reservoir region [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2005, 16(4): 16~19 [乔建平. 三峡库区云阳-巫山段斜坡高差因素对滑坡发育的贡献率研究 [J]. *中国地质灾害防治学报*, 2005, 16(4): 16~19]

[3] Qiao Jian ping. A research into the contribution ratio of the slope shape factors to landslide development along the banks from YunYang to Wushan in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(1): 18~22 [乔建平. 三峡库区云阳-巫山段地形因素对滑坡发育的贡献率研究 [J]. *工程地质学报*, 2006, 14(1): 18~22]

[4] Xiang Xian hua. Analysis of cause of landslip and its measures in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Building Technique Development*, 2003, 30(10): 8~110 [向贤华. 三峡库区滑坡成因分析及治理措施综述 [J]. *建筑技术开发*, 2003, 30(10): 108~110]

[5] Liu Chuan zheng. A new thought of surveying evaluating monitoring and forecasting for the geologic hazards in the Three Gorges on Changjiang River [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(2): 121~126 [刘传正. 三峡库区地质灾害调查评价与监测预警新思维 [J]. *工程地质学报*, 2001, 9(2): 121~126]

[6] She Zu zhan. Cause of quality of soil of landslides its affecting factor and cure measures of in Zigui in Three Gorges Reservoir area [J]. *Geological Exploration For Non-ferrous Metals*, 2002, 6(2): 45~47 [余祖湛. 三峡库区秭归段土质滑坡成因、影响因素及整治措施 [J]. *岩土工程界*, 2002, 6(2): 45~47]

[7] Yang Da yuan. Pilot study on the collapses and landslides of the Three Gorges Reservoir of the Changjiang River [J]. *Journal of Geomechanics*, 2002, 18(2): 173~178 [杨达源. 长江三峡库区崩塌滑坡的初步研究 [J]. *地质力学学报*, 2002, 8(2): 173~178]

[8] Wang Yao. Study on the formation and distribution of landslide geological hazard in the Three Gorges Reservoir area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard And Control*, 2000, 11(2): 24~29 [王垚. 长江三峡库区崩滑地质灾害的形成与分布规律研究 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2000, 11(2): 24~29]

The Contributing Rate of Slope Gradient to Landslide Growth from Yunyang to Wushan in Three Gorges Reservoir Area

QIAO Jianping¹, WU Caiyan^{1, 2}, TIAN Hongling^{1, 2}

(1 · Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China)

2 · Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Landslides developing in Three Gorges Reservoir Area is related to many factors. Slope gradient is one of indispensable internal factors besides lithology, relative elevation and slope aspect. In this paper authors used the method of contributing rate with Geographical Information System (GIS) technology to study how slope gradient contributes to landslide growth. Through detail research on 205 landslides examples, authors found that the slope contributes most whose gradient is among $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$, and this zone is dominant to develop landslides. The research result insculcates preferably with the fact. The result of this paper can provide potent gist to the construction of Three Gorges Reservoir area in future.

Key words Three Gorges reservoir area, landslide, slope gradient, contributing rate

封面照片: 扎曲河谷

扎曲位于青藏高原东部、横断山区北段, 发源于唐古拉山脉北麓三江源自然保护区的杂多县 (属青海省玉树州) 境内, 为澜沧江源头之一。在西藏昌都县昌都镇, 扎曲与澜沧江另一源头——昂曲汇合后称澜沧江。扎曲是典型的高原河流, 其河面高程多在 3 200 ~ 5 000 m 之间, 最低处 (与昂曲汇合处) 海拔也约 3 100 m; 其源区和上游地形舒缓, 分布着众多大大小小的湖泊, 有着广阔无垠的草场, 下游穿行于横断山高山峡谷之中, 河谷宽窄相间。

照片为昌都镇附近扎曲下游, 河流穿越达马拉山段的河谷地貌。该段河流阶地断续发育, 呈干暖河谷景观, 热量较充足 (年平均气温 7.5° , 昌都), 但年降水量较少 (约 470 mm, 昌都)。

(山 水)