

坡度阈值与坡面泥石流

——以重庆市北碚区为例

曾凡伟, 徐刚^{*}, 李青, 桑琰云, 夏大庆

(西南师范大学资环学院, 重庆 400715)

摘 要:通过对重庆市北碚区的 21 个坡面泥石流的实地调查表明, 坡度对坡面泥石流发生具有重要控制性作用。在对坡面泥石流流域大量原始坡度进行统计分析后发现, 各坡面泥石流的坡度分布具有明显的正态分布特征, 且平均坡度分布具有显著的规律。根据这一分布规律, 将本区坡面泥石流发生的坡度阈值确定为三类: 第一类的坡面泥石流植被覆盖率高, 远离居民区, 人类影响活动微弱, 坡度阈值为 32.4° ; 第二类坡面泥石流无一例外均位于林地结合部, 森林覆盖率很低, 人类活动影响十分剧烈, 坡度阈值为 27.3° ; 第三类的两条坡面泥石流相邻, 均位于观音峡峡谷地带, 它们的发生完全受地形条件的控制, 坡度阈值为 36.8° 。本文从定量的角度阐述了坡度阈值与坡面泥石流发生的关系, 为生态脆弱区的划分、工程建设、防灾减灾和政府决策提供服务。

关键词:坡度; 坡度阈值; 坡面泥石流; 正态分布; 防灾减灾

中图分类号: P642. 23

文献标识码: A

1 自然状况及坡面泥石流的分布

北碚区位于重庆市主城区西北面^[1], 距市中心约 50 km, 介于 $29^{\circ}37' \sim 29^{\circ}32' N$, $106^{\circ}18' \sim 106^{\circ}32' E$ 之间。在地质构造上, 北碚区为西南地台、川东南拗褶带、华蓥山阻挡式复被斜帚状弧形构造区重庆弧的一部分, 其褶皱形成构造线为北北东—南南西向的三个背斜: 牛鼻峡背斜、温塘峡背斜和观音峡背斜, 它们和相间分布的三个向斜共同构成北碚区地貌形态的骨架。北碚区最高海拔 952. 2 m, 最低海拔 175 m, 最大高差 777. 2 m, 低山槽谷和沿江河谷占总面积的 40. 12%。嘉陵江切穿三大背斜, 穿北碚而过, 形成有名的嘉陵江小三峡。北碚区为亚热带湿润季风气候, 多年平均降水量 1 138 mm, 最大日降水量 225. 4 mm(1953 年), 降雨主要集中于 5~9 月(占全年的 75% 以上), 且多夜雨。由于优越的

自然条件, 境内森林覆盖率达 20%, 且有少量的亚热带常绿阔叶林分布。

北碚区由于特殊的地质构造, 滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害时有发生, 尤以泥石流中的坡面泥石流的发生最为显著。2003- 07- 19 北碚区日降雨量达 155 mm, 坡面泥石流广泛发育, 直接经济损失达 2 000 万人民币。调查结果表明: 坡面泥石流多发生于坡度较大的背斜低山两侧, 共有坡面泥石流 21 条和沟谷泥石流 5 条。泥石流分布以阳坡居多, 共 20 条, 占总数的 77%, 其中坡面泥石流分布在阳坡的有 19 条, 占坡面泥石流总数的 95%。

2 坡面泥石流的坡度统计值

2003- 07, 坡面泥石流广泛发育之后, 我们对北碚区的所有坡面泥石流进行了详尽的野外调查, 取得了宝贵的第一手资料, 采集了大量的原始数据, 尤

收稿日期(Received date): 2003- 12- 17; 改回日期(Accepted): 2004- 04- 19。

基金项目(Foundation item): 西南师范大学自然地理学博士点开放基金资助(411408)[Supported by the Opening Foundation on Doctor Station of Natural Geography of Southwest Normal University. (411408)]

作者简介(Biography): 曾凡伟(1975-), 男, 四川达县人, 硕士研究生, 主要从事山地灾害与区域可持续发展研究, E-mail: wei233@swnu.edu.cn。[Zeng Fanwei (1975-), Postgraduate of Southwest Normal University, works mainly on mountain calamity and regional sustainable development. E-mail: wei233@swnu.edu.cn.]

^{*} 本文通讯联系人。[Corresponding Author].

其是坡度方面的数据达数万个之多。我们首先将每个坡面泥石流在 1: 2 500 的地图上定位, 然后到实地进行校正, 并对每个坡面泥石流流域进行圈画, 比较精确地确定了各个坡面泥石流的集水区、形成区、流通区(由于坡面泥石流的特殊性, 我们将形成区、流通区合为一体)和堆积区(堆积区不明显, 其堆积物往往直接流入主沟谷, 是沟谷泥石流的主要物质来源)。回到室内后, 在每个坡面泥石流流域范围内, 打 4 mm × 4 mm 的正方形网格进行坡度的求算, 进行微机处理后转换成坡度, 最后选取样本作为验证室内所求坡度的精度, 验证结果误差为 ± 0. 73%, 这证明我们的坡度数据是完全可信的。

我们将所调查的 21 个坡面泥石流的坡度原始数据进行 SPSS 的数学统计分析(表 1)。

表 1 北碚区坡面泥石流坡度统计值

| Table 1 Statistic of gradient of debris flow of hillslope in Bei-bei | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|--------|--------|----------|
| 坡面泥石流 | 数量 | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 标准差 | 方差 |
| 秤砣沟 1 号 | 83 | 5 | 38 | 28. 39 | 6. 24 | 38. 996 |
| 秤砣沟 2 号 | 172 | 13 | 46 | 31. 74 | 4. 92 | 24. 168 |
| 秤砣沟 3 号 | 158 | 6 | 46 | 31. 37 | 7. 18 | 51. 571 |
| 秤砣沟 4 号 | 145 | 6 | 49 | 31. 17 | 6. 83 | 46. 602 |
| 秤砣沟 5 号 | 421 | 6 | 48 | 32. 10 | 8. 26 | 68. 195 |
| 秤砣沟 6 号 | 195 | 8 | 46 | 33. 09 | 5. 98 | 35. 771 |
| 秤砣沟 7 号 | 167 | 5 | 51 | 31. 02 | 9. 77 | 95. 397 |
| 秤砣沟 8 号 | 203 | 7 | 58 | 33. 51 | 7. 91 | 62. 558 |
| 秤砣沟 9 号 | 258 | 9 | 49 | 31. 42 | 6. 02 | 36. 213 |
| 秤砣沟 10 号 | 147 | 6 | 43 | 29. 53 | 5. 99 | 35. 840 |
| 秤砣沟 11 号 | 187 | 5 | 48 | 32. 20 | 6. 81 | 46. 418 |
| 秤砣沟 12 号 | 205 | 4 | 49 | 32. 74 | 7. 21 | 51. 928 |
| 秤砣前 2 号 | 91 | 15 | 58 | 36. 78 | 8. 52 | 72. 640 |
| 秤砣前 1 号 | 161 | 13 | 63 | 36. 94 | 10. 10 | 101. 966 |
| 水泥厂 1 号 | 190 | 7 | 44 | 25. 46 | 6. 81 | 46. 408 |
| 水泥厂 2 号 | 213 | 7 | 38 | 25. 68 | 5. 29 | 27. 964 |
| 凤凰寺 1 号 | 341 | 14 | 47 | 26. 96 | 5. 76 | 33. 172 |
| 凤凰寺 2 号 | 195 | 11 | 45 | 27. 04 | 5. 75 | 33. 086 |
| 磨石盘 | 612 | 4 | 46 | 28. 22 | 6. 82 | 46. 544 |
| 九龙寨 1 号 | 57 | 19 | 46 | 34. 56 | 6. 81 | 46. 429 |
| 九龙寨 2 号 | 191 | 13 | 46 | 33. 96 | 7. 06 | 49. 899 |

从表中的坡度平均值可以看出, 坡面泥石流的流域平均坡度界于 25°~ 37° 间, 而尤以 31°~ 35° 的坡度最为集中, 约占坡面泥石流总数的 56%。但坡面泥石流发生的坡度阈值(即坡度临界值: 指坡地系统演化过程中, 坡度的变化达到一定限度时, 会使整个坡地系统发生突变, 这个极限值称为“坡度阈值”或“坡度临界值”。)的大小还有待进一步分析才能找到。故首先必须论证坡面泥石流的坡度分布规律, 然后再进一步探讨坡度阈值的问题。

2. 1 坡度在坡面泥石流中的概率分布

为了进一步研究坡面泥石流的坡度分布规律, 必须对它们进行概率分布分析。利用统计软件 SPSS 和 EXCEL 做出每个坡面泥石流坡度(本文仅以秤砣沟 6 号坡面泥石流为例, 其它 20 个坡面泥石流分布的确定采取类似的方法)的频数分布直方图。通过分析 21 个坡面泥石流的频数分布直方图, 它们的形状基本相似, 均与正态分布的图形相似, 据此初步推断 21 个坡面泥石流的坡度可能服从正态分布。

2. 1. 1 坡度的频数分布

对秤砣沟 6 号坡面泥石流的 195 个原始坡度数据进行分组统计, 可得频数分布表(表 2)。

2. 1. 2 坡面泥石流的坡度频数直方图

由频数分布表提供的数据, 可以作出坡度的频率直方图, 见图 1。

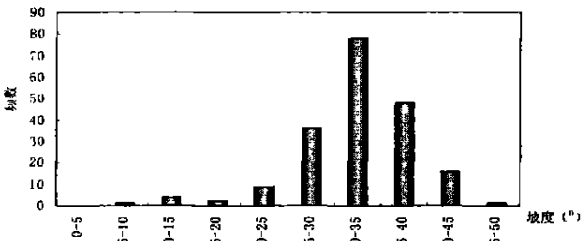


图 1 秤砣沟 6 号坡度频数分布直方图

Fig. 1 Distribution frequency of Histogram of slope in sixth Chengtuo gully

通过综合分析频数分布表中数据的分布规律及频率直方图的形状和特点, 可以初步认为坡面泥石流的坡度服从正态分布。

表 2 秤砣沟 6 号坡面泥石流坡度的频数分布

| Table 2 Distribution frequency of hillslope debris flow in sixth Chengtuo gully | | | | | | | | | | | |
|---|--------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| 数据分组 | 0°~ 5° | 5°~ 10° | 10°~ 15° | 15°~ 20° | 20°~ 25° | 25°~ 30° | 30°~ 35° | 35°~ 40° | 40°~ 45° | 45°~ 50° | |
| 数量(个) | 0 | 1 | 4 | 2 | 9 | 36 | 78 | 48 | 16 | 1 | |

2.1.3 坡度的正态分布检验

根据正态分布的特征, 首先根据样本数据和拟
定理论分布, 查分布表得到相应的理论累积概率分
布函数 $F_0(x)$; 然后利用样本数据的累计概率得到
检验累计概率分布函数 $S_0(x)$; 最后计算 $F_0(x)$ 和
 $S_0(x)$ 在相应的变量值点 x 上的差 $D(x)$, 得到差值
序列 D 。输入数据后, SPSS 将用 Kolmogorov 和
Smirnov 提出的 Normal 拟合优度的非参数检验方
法进行检验。检验结果见表 3。

表 3 K-S 拟合优度检验

Table 3 One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

| 秤砣沟 6 号 | 数 量 (N) | 正态参数 (a, b) | 标准方差 | 最大极值 | K-S 的 Z 检 验 值 | 相伴概率 (2-tailed) |
|------------|------------|----------------|--------|-------|------------------|--------------------|
| | 11 | 平均值 | 25.664 | 绝对值 | 0.894 | 0.401 |
| | | 17.727 3 | | 0.269 | | |

注: a. 正态分布检验 b. 数据来源

从结果可以看出, 样本数据的均值为 17.727 3,
标准方差为 25.664。K-S 的 Z 统计量为 0.894, 对
应的相伴概率为 0.401, 大于显著性水平 0.05, 因此
不能拒绝零假设, 认为秤砣沟 6 号的 195 个坡度数
据服从正态分布。

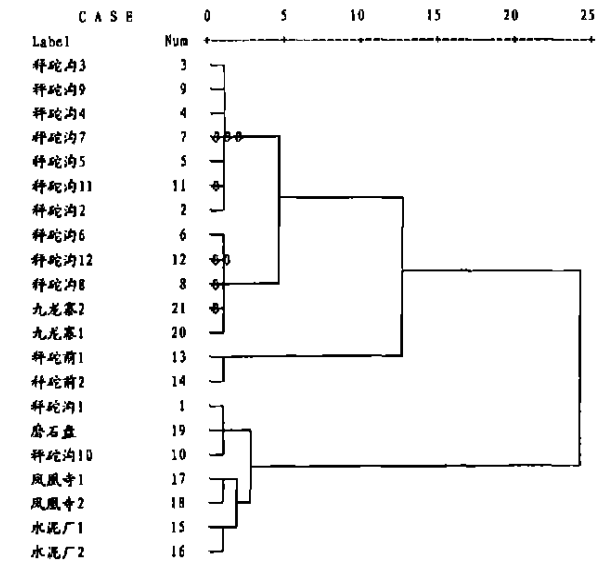


图 2 坡面泥石流坡度聚类分析
Fig. 2 Rescaled Distance Cluster

2.2 坡度阈值探讨

对 21 个坡面泥石流的坡度进行统计后可以看
出, 坡度分布具有明显的正态分布特征, 坡面泥石流

的发生具有明显的受坡度控制的特征。为了进一步
探讨坡面泥石流发生的坡度阈值, 本文将对 21 个坡
面泥石流的平均坡度采用层次聚类法中的 Q 形聚
类方法, 用树形输出的方式表示聚类的过程, 从而得
到控制性坡度的分组结果。

从聚类结果可以看出, 21 个坡面泥石流的平均
坡度可分为三类: 第一类共 12 条坡面泥石流, 平均
坡度 32.4° , 占总数的 57.1% ; 第二类共 7 条坡面泥
石流, 平均坡度 27.3° , 占总数的 33.3% ; 第三类仅
有 2 条, 平均坡度 36.8° , 占总数的 9.5% 。从实地
考察结果来看, 坡面泥石流的坡度临界值之所以存在
差异的主要原因是: 第一类的坡面泥石流植被覆
盖度高, 远离居民区, 人类影响活动微弱; 第二类坡
面泥石流无一例外的均位于林地结合部, 森林覆盖
率很低, 人类活动影响十分剧烈; 第三类的两条坡面
泥石流相邻, 均位于观音峡峡谷地带, 它们的发生完
全受地形条件的控制。

3 坡度阈值与坡面泥石流

坡面泥石流的本质是一个开放的坡地系统, 坡
面泥石流的发生实质是坡地系统与外界进行物质和
能量交换的结果, 在这一过程中坡地系统的能量不
断被消耗, 系统原有的熵不断减少, 坡地系统由无序
走向有序, 是具有典型耗散结构的耗散系统。在坡
面泥石流中, 坡度是一个重要的控制性因素, 研究表
明: 坡度的主要作用在于改变坡面土壤颗粒的稳定
条件和改变地面水动力条件。坡度不同时, 坡积物
的厚度, 各种作用力的大小都会受到很大的影响, 从
而影响到坡面泥石流发生的强度和规模的大小。同
时坡度也是坡面固有的总有效能量分配到整个景观
的媒介, 随着坡度的增加, 土粒的内摩擦角减少, 坡
面物质的静止稳定性降低, 水流的动能随之增加, 其
冲刷能力加强, 在一定的坡度范围内, 其侵蚀强度随
坡度的增加而加大。但这种侵蚀强度的大小并不是
随坡度的增加而无限的成正比增加。卡森认为^[2]:
..... $< 45^{\circ}$ 的坡度将有利于坡积物的堆积, 为坡面泥
石流的发生创造了物资条件。而陆中臣认为黄土高
原地区坡面要发生侵蚀的条件是坡度 $\geq 16^{\circ}$ ^[3], 坡度
侵蚀临界值约为 30° 。而作为比坡面侵蚀更难发生
的坡面泥石流所要求的坡度应更大, 由统计资料可
知, 北碚区坡面泥石流的坡度确实界于 $16^{\circ} \sim 45^{\circ}$, 且
主要集中于 $25^{\circ} \sim 40^{\circ}$ (占 83% 以上)。

从理论上讲, 坡面泥石流发生的坡度阈值应是坡面水流及坡面物质势能最大的角度, 但由于二者有相互制约机制的存在(即内摩擦角与重力的相互作用), 所以坡度阈值往往小于最大势能坡度角。这就从另一个角度映证了卡森^[2]的坡面形态理论的正确性。由此可见, 不同地区的坡度阈值是不同的, 即使同一地区的不同地段的坡度阈值也有差异。有的受地形条件的控制, 有的受人类活动和植被的综合影响, 有的完全受地形的制约。就北碚区泥石流的发生而言, 其与坡度的关系是极其紧密的。在植被覆盖率高, 人类影响较小的地区, 坡度临界值较大, 约为 32.4° ; 在植被覆盖率较低, 人类活动频繁的地区, 坡度临界值较小, 约为 27.3° ; 而由地形条件控制的坡面泥石流的坡度阈值则最大, 约为 36.8° 。

因此, 准确的确定一个地区的坡度阈值显得极其重要。一方面: 坡度阈值确定后, 将有利于量化各种力的大小(包括剪切应力、水的顺流分力、壤中流流向坡下的净分力、以及重力、支承力、摩擦力、浮力和拽力的大小, 而这些力是决定坡面泥石流是否发

生、以及规模大小的重要因素), 从而为进一步探讨坡面泥石流的发生机制奠定基础。另一方面: 坡度阈值确定后, 可以划分出北碚区的生态稳定区和生态脆弱区, 加大对生态脆弱区的投入, 如退耕还林、还草、植树造林、封山育林、迁移居民等措施, 对难于搬迁的工矿企业, 要加强防护措施。加强坡度对坡面泥石流影响的研究, 探寻坡面泥石流发生的坡度阈值, 无疑将具有重大的理论意义和现实意义, 从而为本区的防灾救灾、工程建设和政府决策提供服务。

参考文献(References):

- [1] Tang Wenguang, Wang Lizhi. Natural Geography in Beibei[M]. Chongqing: Southwest Normal University Press, 1996. 1~ 3[唐文光, 王力之. 北碚自然地理[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 1986: 1~ 3.]
- [2] M. A. Carson and M. J. Kirkby, Translated by Dou Baozhang. HILLSLOPE FORM AND PROCESS[M]. Beijing: Science Press, 1984. 28~ 66 [M. A. 卡森, M. J. 柯克拜著, 窦葆璋译. 坡面形态与形成过程[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 28~ 66.]
- [3] Lu Zhongcheng *et al.* Drainage Relief System[M]. Dalian: Dalian Press, 1991. 14~ 42. [陆中臣, 等. 流域地貌系统[M]. 大连: 大连出版社, 1991: 14~ 42.]

Critical Gradient and Debris Flow on Slope

A Case Study in Beibei, Chongqing

ZENG Fanwei, XU Gang, LI Qing, Sang Yanyun, XIA Daqing

(The School of Resources and Environment Science, Southwest Normal University, Chongqing, 400715, China.)

Abstract: The investigations of 21 debris flows on slopes in Beibei district, Chongqing reveal that the gradient is crucial to debris flow formation. We find that the distribution of gradients is the normal distribution. According to the distribution of the average gradients of the drainage areas, We make sure that the critical gradients can be classified into three kinds. The average of the first kind is 32.4° degrees. The debris flows belonged to the first kind of the critical gradients are apart from residential areas and human being's activities are feeble, and at the same time, their vegetation rates are higher. The average of the second kind of the critical gradients is 27.3° degrees. The debris flows belonged to the second kind of the critical gradients are located the combinations of woodlands and farmlands, and human being's activities are acute and the vegetation rates are lower. The average of the third kind of the critical gradients is 36.8° degrees. The debris flows belonged to the third kind of the critical gradients are in the Guanyin gorge. They are controlled by the terrain condition. We have found the relationship between the crucial gradients and the debris flow on mountain slopes. It can afford services to the dividing ecological frailty sections, engineering construction, preventing and decreasing disasters, and the government decision-making.

Key words: crucial gradient; critical gradient; debris-flow on mountain slope; normal distribution; preventing and decreasing disaster