

西藏樟木沟泥石流成因分析及综合评判

刘大翔^{1,2,3,4,5}, 黄金辉^{3,4,5}, 赵鑫^{3,4,5}, 张小刚^{3,4}, 程尊兰^{3,4}, 刘建康^{3,4,5}

(1. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 4. 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; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 樟木沟泥石流对西藏地区唯一的国家一类陆路通商口岸——樟木口岸具有较大威胁, 为合理制定泥石流防治方案, 在研究樟木沟泥石流形成条件和动力学特性的基础上, 分别采用数量化综合评判方法和模糊数学综合评判方法对该泥石流沟的易发程度进行了评价。综合评判结果显示, 樟木沟为一条轻度易发泥石流沟, 但有偏向中度易发泥石流的倾向。此外, 对沟道断面清水流量的监测结果表明, 樟木沟内常年流水是樟木镇松散层内地下水的主要补给源, 对樟木滑坡群稳定性有不利影响。

关键词: 樟木沟泥石流; 形成条件; 综合评判; 樟木口岸

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)02-0100-05

中图分类号: TV144

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.022

Cause Analysis and Comprehensive Evaluation of Debris Flow in Zhangmu Gully in Tibet

LIU Da-xiang^{1,2,3,4,5}, HUANG Jin-hui^{3,4,5}, ZHAO Xin^{3,4,5},

ZHANG Xiao-gang^{3,4}, CHENG Zun-lan^{3,4}, LIU Jian-kang^{3,4,5}

(1. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-environment in Three Gorges Area of Hubei Province, Yichang, Hubei 433002, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Key Lab of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 4. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 5. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

(1. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-environment in Three Gorges Area of Hubei Province, Yichang, Hubei 433002, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Key Lab of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 4. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 5. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: The debris flow in Zhangmu gully is a great threat to Zhangmu treaty port, which is the only national level 1 treaty port in Tibet. In order to design a program to prevent debris flow, the study analyzed the forming conditions and dynamic characteristics of the debris flow gully, then evaluated the possibility of the occurrence of debris flow through quantitative and comprehensive method and fuzzy mathematic comprehensive evaluation method respectively. The result showed that Zhangmu gully is prone to has slight debris flow, but also has a possibility of moderate debris flow. In addition, monitoring results of the water flow showed that the running water in Zhangmu gully is the mainly supply source of groundwater in loose layer under Zhangmu town. This may has negative effect on the stability of Zhangmu landslide group.

Keywords: debris flow in Zhangmu gully; forming conditions; comprehensive evaluation; Zhangmu treaty port

樟木口岸位于喜马拉雅山南麓的中尼边境樟木镇境内, 距聂拉木县城 30 km, 是西藏地区唯一的国家一类陆路通商口岸, 口岸边境贸易总值达到 $3 \sim 4 \times 10^8$ 元/a, 对中国西藏和尼泊尔的经济发展与交流至关重要。樟木沟位于樟木口岸上游, 为波曲河左岸

一级支流, 南距友谊桥约 12 km, 主沟沟口地理坐标为东经 $85^{\circ}58'35.77''$, 北纬 $27^{\circ}59'46.50''$, 下游有中尼公路通过, 交通较为便利。樟木沟曾于 2001 年爆发过泥石流, 冲出的固体物质淤埋跌水处下游方向三段回头弯的中尼公路, 导致交通中断整日, 严重影响了

收稿日期: 2013-05-22

修回日期: 2013-07-21

资助项目: 国家自然科学基金项目“藏东南溜砂的形成及运动机理研究”(40971015), “西藏扎墨公路不同山地垂直地带的泥石流形成机理和成灾规律”(41371038); 中交股份科技研发项目(2011-ZJKJ-04); 交通运输部科技项目(201231879210)

作者简介: 刘大翔(1987—), 男(汉族), 湖北省潜江市人, 博士, 讲师, 研究方向为泥石流发生机理及防治技术。E-mail: liudaxiang004@163.com。

通信作者: 程尊兰(1952—), 女(汉族), 四川省隆昌县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事山地灾害防治研究。E-mail: czl@imde.ac.cn。

中尼两国的贸易往来。近 10 a 来,樟木沟虽未爆发大规模泥石流,但夏季沟内常出现山洪,爆发泥石流的可能性较大。因此,有必要对其形成条件进行分析并对其易发程度加以综合评判,为防治工程设计提供依据。

1 研究区环境背景条件

1.1 地貌环境

樟木沟位于喜马拉雅山脉南坡波曲河下游左岸斜坡地带,发源于樟木镇后山扎美拉山南侧,在海关监管货场处汇入波曲。主沟长度 3.02 km,汇水面积约 2.332 km²,沟谷平均纵坡 519‰。流域地势起伏较大,高程范围 2 000~4 000 m,坡度范围 30°~55°。沟道地形陡峻,沟源有古冰碛地貌发育,外营力作用以冰缘及寒冻风化作用为主;沟道中上游地段切割较深,沟谷狭窄,谷坡陡立,平均切割深度为 10~20 m,最深地段超过 60 m;沟道中下游已经切穿松散层到达基岩,局部河床基岩裸露,多跌坎,沟道内发育三级较大陡坎,其中靠近波曲河的最下级跌坎高度逾 30 m。

1.2 水文、气象

樟木沟流域地处喜马拉雅山南坡,属亚热带季风潮湿湿润气候区,由于受印度洋海洋性气候影响,表现为降雨丰富、集中,且暴雨强度较大。年降水量 2 450~3 100 mm,多年平均降水量 2 820 mm,是西藏地区典型的暴雨中心之一。该地区多年平均气温 12℃,最高气温 32℃,最低气温 -1℃,多年平均相对湿度 75%;多年平均蒸发量 1 500 mm。

1.3 地层岩性

研究区内地层较为单一,基岩以前震旦系变质岩为主,表部为第四系块、碎石土。其中前震旦纪变质岩主要包括达莱玛桥组二云母片麻岩、云母石英片岩等,而第四纪地层主要为全新统崩滑堆积物(Q₄^{col+dl})、全新统冲洪积物(Q₄^{al+pl})。

1.4 地质构造

研究区位于喜马拉雅结晶基底复式背斜的北翼,为单斜构造,岩层倾向 NE,倾角 20°~40°。波曲河断层为区内最大的区域性断裂,樟木沟沟口与之相接。在樟木沟中尼路边小瀑布附近发育一小断裂,西北端尖灭于中尼公路外侧,东南端插入樟木后山。区内岩层变质程度较深,达角闪岩相,片理、片麻理发育,主要构造形迹为断层和节理,褶皱不发育。长期沿节理和断层发生的崩塌造就了樟木沟北侧的陡壁,即扎美拉山,也成为樟木沟泥石流的重要固体物质来源。

1.5 植被状况

研究区属于珠穆朗玛峰自然保护区,境内拥有雪布岗核心保护区,动植物资源十分丰富。沟域属于高山林灌丛草甸地带,由低海拔向高海拔依次出现针阔混交林带(海拔 1 500~3 000 m)、针叶林带(海拔 3 000~3 300 m)、灌木林带(海拔 3 300~4 400 m),植被生长茂盛,覆盖率达 90%以上,带谱结构较复杂,均为适应湿润气候的植物群落组成,属于海洋型山地植被垂直结构类型^[1]。总体来讲,樟木沟植被条件较好,对减缓泥石流的发育或危害起到了正面作用。

2 泥石流形成条件

2.1 泥石流沟谷特征

樟木沟流域支沟发育,共有 5 条较大支沟汇入,沟域形态受构造与扎美拉山崩塌的影响成不对称分布,支沟大多分布在沟域右侧。根据地貌及泥石流物源补给特征,将樟木沟主沟划分为清水区、形成流通区和堆积区 3 个分区。各区特征详见表 1。

表 1 樟木沟泥石流分区特征

分区	面积/ km ²	沟道长 度/km	高程范 围/m	纵比降/ ‰
清水区	0.288	0.59	3 466~3 930	650
形成流通区	1.732	1.94	2 439~3 466	80~400
堆积区	0.312	0.49	2 199~2 439	480

2.2 泥石流分区特征

2.2.1 清水区 泥石流清水区分布于樟木沟上游,地形陡峻,斜坡坡度多为 40°以上,沟谷纵坡大,多在 650‰以上,松散堆积层较薄,主要为基岩斜坡,不良地质现象较少,分布零星,大多不会参与泥石流活动,主要为泥石流的形成汇集水源和提供水动力条件。

2.2.2 形成流通区 形成流通区分布于中尼公路以上段,沟谷岸坡陡峻,崩塌发育,松散堆积体厚度相对较大,不良地质现象发育,且植被破坏较严重。该段沟床纵比降相对较缓,主沟纵坡一般为 80‰~400‰,沟床两侧崩塌较多,沟床堆积物非常丰富,为泥石流的发育提供了大量松散固体物源,是樟木沟泥石流的主要松散固体物源分布区。

2.2.3 堆积区 泥石流堆积区位于中尼公路以下至沟口段,扇区堆积厚度 5~25 m,扇区泥石流堆积物方量约 1.20×10⁶ m³。该段沟谷平均纵坡稍缓,有利于泥石流物质的停淤。值得一提的是,沟道与波曲河连接处有一级高逾 30 m 的陡坎,樟木沟泥石流一旦爆发,大量的固体物质将输入波曲河,造成河床淤积,压缩行洪断面。

2.3 物源条件

2.3.1 物源类型 按照松散物质的性质及其分布位置的差异,可将泥石流物源分为重力作用堆积物、沟道堆积物、冰碛及寒冻风化形成的松散物质 3 类。其中崩塌是最常见的重力作用类型,沟域北侧扎美拉山崩塌极为发育,坡面广布新老崩塌堆积,成为泥石流发育的主要物源。沟道堆积物也是区内泥石流发育的主要物源,主要为原沟床中的堆积物。冰碛及寒冻风化形成的松散物质分布在海拔 3 000 m 以上沟道中上游的斜坡面上,主要为在冻融作用、寒冻风化作用下形成的松散物质,可通过崩塌、滚石、滑坡及流水侵蚀等方式进入沟道,成为泥石流的固体物源。

2.3.2 物源分布 樟木沟重力作用堆积物可分为两

类,一类为右岸广布的扎美拉山崩塌堆积物,规模较大但活动性较弱。据调查,该类松散堆积物体积达 $9.80 \times 10^6 \text{ m}^3$,可能参与泥石流活动的动储量为 $9.66 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。另一类为沟道两侧的新崩滑物源,规模较小但活动性强。据勘查,樟木沟流域内共发育不同规模的新崩滑 6 处,崩滑堆积物总体积为 $5.17 \times 10^4 \text{ m}^3$,可能参与泥石流活动的动储量为 $3.62 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。新崩滑物源具体分布情况详见表 2。

沟道松散堆积物多分布于中游,粒径沿下游方向呈增大趋势,陡坎地段发育较少。由于沟床坡度变小,沟谷展宽,目前沟道内仍有大量冲洪积物。经估算,樟木沟沟道物质总方量约为 $1.52 \times 10^5 \text{ m}^3$,可能参与泥石流活动的动储量约为 $3.04 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

表 2 樟木沟新崩滑物源统计

编号	规模/ m^3	高程/m	位置	稳定性	储量/ m^3	动储量/ m^3	沟谷岸别	物质成分
B-1	25×15×1	2 687	85°59'31"E 27°59'54"N	不稳定	375	263	左	固结程度高,卵石有一定磨圆,可参与泥石流活动量少
B-2	100×55×2	2 665	85°59'32"E 27°59'54"N	不稳定	11 000	7 700	左	固结程度高,可参与量少
B-3	50×30×1	2 684	85°59'34"E 27°59'54"N	不稳定	1 500	1 050	左	主要为小块石和细沙,结构松散
B-4	150×23×10	2 732	85°59'33"E 27°59'54"N	不稳定	34 500	24 150	右	结构松散
B-5	30×20×3	3 154	85°59'12"E 27°59'53"N	稳定	1 800	1 260	左	结构松散
B-6	50×13×4	3 213	85°59'28"E 27°59'54"N	不稳定	2 600	1 820	左	结构松散

樟木沟沟源外营力作用以冰雪作用和冻融风化作用为主。寒冻风化形成的松散堆积也是樟木沟泥石流物源的补给来源之一。经估算,该类物源的总方量约为 $5.76 \times 10^5 \text{ m}^3$,可能参与泥石流活动的动储量约为 $2.88 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2.3.3 物源统计 通过对流域内松散碎屑物质厚度和范围进行调查和遥感解译,可计算松散碎屑物质储量。根据计算结果,该流域可提供泥石流的固体物源总量为 $1.06 \times 10^7 \text{ m}^3$,可参与泥石流活动的动储量为 $1.08 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。物源统计结果详见表 3。

表 3 樟木沟物源统计

10^4 m^3

类别	新崩、滑	老崩、坡积	沟道堆积	冰碛及寒冻风化	物源总量	物源动储量
数量	5.17	980	15.2	57.6	1 057.97	107.54

2.4 水源条件

充足的水源补给条件使得樟木沟属于常年流水沟。流域上游高海拔地区的冰雪融水在枯水期起天然调节作用,使沟内径流稳定,基流较大。同时因流域内岩石较坚硬,质地比降致密,渗透性小,而且降水集中于雨季,在雨季土壤总处于饱和或近饱和状态。因沟道内发育三级陡坎,水量变化比较大,平水期流量为 $0.001 \sim 0.002 \text{ m}^3/\text{s}$,雨季流量为 $0.05 \sim 0.1$

m^3/s ,降雨期间水量会剧增。

樟木沟内常年性流水不仅会冲刷两侧松散层引起崩塌,更重要的是常年性流水是樟木镇松散层地下水的主要补给源,通过对枯水季樟木沟断面清水流量测量(表 4),发现在泥石流形成流通区清水流量先降低后增大,且 1# 与 2# 断面在高程相差 30 m 内时,清水流量降低比例就达到 28.6%,说明樟木沟流域内充足的水源补给条件除了会对两侧松散层形成冲刷

并引起崩塌之外,更是樟木镇松散层内地下水的主要补给源,可能对樟木滑坡群稳定性有不利影响,需引起重视。

表 4 樟木沟枯水季断面清水流量测量值

断面编号	高程/m	断面面积/m ²	平均流速/(m·s ⁻¹)	断面清水流量/(m ³ ·s ⁻¹)
1#	2 789	0.066	0.212	0.014
2#	2 768	0.029	0.337	0.010
3#	2 690	0.052	0.418	0.022
4#	2 676	0.084	0.444	0.037

3 泥石流类型及动力学特征

3.1 泥石流类型

樟木沟有明显的分区特征,属于沟谷型泥石流。根据对邦东村村民的调查,樟木沟曾经于 2001 年暴发泥石流,其余时间以山洪为主,因此从发生频率看属中频泥石流沟。通过野外泥石流堆积特征,可判断樟木沟泥石流暴发属于稀性泥石流。

3.2 泥石流动力学特征

采用《泥石流灾害防治工程勘察规范(DT/T0220—2006)》附录 I 提供的西南地区(铁二院)稀性泥石流流速计算公式^[2]:

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\gamma_H \varphi_c + 1}} \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2}$$

式中: γ_H ——泥石流中固体物质容重,取值 2.65 t/m³; φ_c ——泥石流泥沙修正系数,取值 0.405; n ——沟床糙率系数,取值 6.5; R ——水力半径,取值 1.7 m; I ——水力坡度,取值 519‰; V_c ——泥石流平均流速,通过计算,樟木沟泥石流平均流速为 4.63 m/s。

运用中国水利水电科学研究院水文研究所提出的推理公式^[3],由设计暴雨推求设计清水洪峰流量 Q_B ,即假定暴雨和洪水及泥石流同频率出现,然后用配方法计算泥石流设计洪峰流量 Q_c 。其计算公式为:

$$Q_c = (1 + \varphi_c) Q_B D_c$$

式中: φ_c ——泥沙修正系数; D_c ——堵塞系数。推理公式法的计算结果详见表 5。

再运用形态调查法计算泥石流洪峰流量,将过流断面面积 W_c 与泥石流流速 V_c 相乘,泥石流洪峰流量即为:

$$Q_c = W_c \cdot V_c$$

式中: V_c ——流速,其值为 4.63 m/s; W_c ——断面面

积,其值为 8.4 m²。计算得出泥石流流量 Q_c 为 38.94 m³/s。

通过对比,可见樟木沟泥石流形态调查法流量值与推理公式法设计频率 $P=5\%$ 时的情况较为吻合。

表 5 推理公式法计算得出的樟木沟泥石流流量

泥石流特征指标	设计频率 P		
	1%	2%	5%
泥沙修正系数 φ_c	0.575	0.5	0.405
堵塞系数 D_c	1.3	1.3	1.2
暴雨洪峰流量 $Q_B/(m^3 \cdot s^{-1})$	33.33	29.73	24.80
泥石流洪峰流量 $Q_c/(m^3 \cdot s^{-1})$	62.16	47.09	36.38

泥石流整体冲击力按《泥石流灾害防治工程设计规范》提供的公式计算:

$$P = \lambda \frac{\gamma_c}{g} V_c^2 \sin \alpha$$

其中,建筑物形状系数 λ 按矩形建筑物取值 1.33,泥石流重度 γ_c 为 1.3 t/m³,建筑物受力面与泥石流冲击力方向的夹角 α 为 90°。计算得出泥石流整体冲击力 $P=37.06$ kN。

4 泥石流综合评判

4.1 泥石流数量化综合评判

数量化综合评判法自 1986 年开始被用于泥石流的严重程度评价后^[4],便开始被广泛用于泥石流的数量化综合评判。根据泥石流流域基本特征和参数,按照《泥石流灾害防治工程勘察规范(DT/T0220—2006)》附录 G“泥石流沟的数量化综合评判及易发程度等级标准”,选取了沟道纵坡、植被覆盖率、流域面积等 15 个参数,对每个参数评分后取总分进行泥石流综合评判(表 6),得出樟木沟评分结果为 81 分,因此樟木沟严重等级为轻度易发。评分结果显示,沟道纵坡、沿沟松散物储量、流域相对高差、河沟堵塞程度 4 个因素得分较高,说明其对泥石流的发生起主要作用。

4.2 泥石流模糊数学综合评判

数量化综合评判虽然可以对泥石流进行定量评价,但不能对泥石流变化特性进行表述,因此模糊数学综合评判便被提出来。模糊综合评判法是一种以模糊推理为主的、定性与定量相结合、精确与非精确相统一的分析评判方法,为处理具有不确定性的事物提供了新思路。不少学者^[5-6]将模糊数学理论引入泥石流危险度的评价研究中,并已取得很多成果,实践证明该方法有很高的准确度。

表 6 樟木沟泥石流易发程度数量化评分

影响因素	调查情况/测量数据	得分
崩塌滑坡及水土流失(自然和人为)的严重程度	崩塌、滑坡发育,多浅层滑坡和中小型崩塌,有零星植被覆盖,冲沟发育	13
泥沙沿程补给长度比/%	30~60	11
沟口泥石流堆积活动	主河河形无变化,主流不偏	1
河沟纵坡/%	>21.3	12
区域构造影响程度	强抬升区,6级以上地震区	7
流域植被覆盖率/%	>60	1
河沟近期一次变幅/m	0.2	4
岩性影响	风化和节理发育的硬岩	4
沿沟松散物储量/(10 ⁴ m ³ · km ⁻²)	>10	6
沟岸山坡坡度/%	28.6~46.6	4
产沙区沟槽横断面	V形谷、谷中谷、U形谷	5
产沙区松散物平均厚度/m	<1	1
流域面积/km ²	0.2~5.0	5
流域相对高差/m	>500	4
河沟堵塞程度	严重	3
总分		81

以《泥石流灾害防治工程勘查规范(DT/T0220—2006)》中数量化综合评判中的因素为基础进行模糊数学综合评价,具体方法可见相关文献^[5-6]。通过计算可得评判矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.75 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.75 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

对于权重子集的确定,可利用公式计算:

$$w_i = c_i / \sum_{i=1}^n c_i$$

式中: c_i ——第 i 个因素在数量化评判中的最大值。由此得到权重子集:

$$W = [0.16, 0.12, 0.11, 0.09, 0.07, 0.07, 0.06, 0.05, 0.05, 0.05, 0.04, 0.04, 0.04, 0.03, 0.03]$$

权重子集 W 与评判矩阵 R 相乘后可得到评判集 B , 即 $B = W \cdot R = [0.22, 0.31, 0.23, 0.25]$ 。根据最

大隶属度原则确定泥石流的易发性,由表 7 判断樟木沟泥石流为轻度易发泥石流,与数量化评判结果一致。

表 7 模糊数学综合评判结果

项目	不易发	轻度易发	中度易发	易发
隶属度	0.22	0.31	0.23	0.25

5 结论

(1) 樟木沟地形陡峭,沟谷纵坡大,分区明显,具有典型的沟谷型泥石流的特点,流域内水源丰富,断层和节理发育,可提供的泥石流固体物源主要由沟道两侧的崩滑堆积物和沟道内的松散堆积物组成,物源总量与动储量均较大,根据规范估算的泥石流整体冲压力大。一旦泥石流爆发,将对位于沟口的中尼公路、停车场、加油站以及波曲河威胁严重。

(2) 根据推理公式法和形态调查法计算的泥石流流量结果对比表明,樟木沟泥石流形态调查法流量值与设计频率 $P=5\%$ 时的情况较为吻合。

(3) 综合数量化综合评判和模糊数学综合评判结果,认为樟木沟属于轻度易发泥石流沟,沟道纵坡、沿沟松散物储量、流域相对高差、河沟堵塞程度是引发泥石流的主要因素。但根据综合评判的打分分值和易发程度隶属度来看,樟木沟泥石流有偏向中度易发的倾向。

(下转第 110 页)

空间自相关程度分别为 94.0%, 91.9% 和 97.8%, 自相关程度大小顺序为旷野风速表现为: $10.3 \text{ m/s} > 5.4 \text{ m/s} > 7.2 \text{ m/s}$ 。

(3) 旷野风速对林网内风速分布及防风效能的影响比较复杂, 并不是单一的随着风速的增大而增大或减小, 受林带结构及疏透度的影响较大。3 种旷野风速下主林带 1 的背风面均形成一个较大范围的降风区, 降风区范围分别在主林带背风面的 $50 \sim 90 \text{ m}$, $40 \sim 80 \text{ m}$, $40 \sim 80 \text{ m}$, 最低风速出现在主林带 1 背风面 $60 \sim 80 \text{ m}$ 处, 林网内降风区范围大小顺序为: $5.4 \text{ m/s} > 10.3 \text{ m/s} > 7.2 \text{ m/s}$, 林网有效防护面积内低风速区域大小顺序为: $5.4 \text{ m/s} > 10.3 \text{ m/s} > 7.2 \text{ m/s}$, 表现为随着风速的增大呈现先减小后增大的趋势。

[参 考 文 献]

- [1] 王永兴, 张小雷. 绿洲地域关系及其演变规律的初步研究[J]. 干旱区地理, 1999, 22(1): 62-68.
- [2] 郝玉光, 包耀贤, 刘明虎, 等. 干旱沙区农田防护林营建模式与经营评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(5): 199-203.
- [3] 江爱良. 华南植胶区防护林气象效能的试验考察报告(1954—1957年)[M]. 北京: 科学出版社, 1958.
- [4] Sun D, Dickinson G R. Wind effect on windbreak establishment in Northern Australia [J]. Tree Planters' Notes, 1994, 45(2): 72-75.
- [5] 范志平, 孙学凯, 王琼, 等. 农田防护林带组合方式对近地面风速作用特征的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2010, 29(2): 320-323.
- [6] 郝玉光, 卢平. 乌兰布和沙区人工绿洲农田防护林小气候效益与作物产量关系的研究[J]. 林业科学研究, 1997, 10(1): 19-23.
- [7] 朱廷曜, 周广胜. 农田林网地区风速减弱规律的探讨[J]. 应用生态学报, 1993, 4(2): 136-140.
- [8] Zhang H, Brandle J R, Meyer G E, et al. The relationship between open windspeed and windspeed reduction in shelter[J]. Agrofor. Syst., 1995, 32(3): 297-311.
- [9] 李永平, 冯永忠, 杨改河. 北方旱区农田防护林防风效应研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 92-98.
- [10] 宋兆民, 陈建业, 杨立文, 等. 河北省深县农田防护林防护效应的研究[J]. 林业科学, 1981, 27(1): 8-19.
- [11] 黄超. 黄河下游滩区农田林网综合气候效应场的研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2011.
- [12] 曹新孙. 农田防护林学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985.
- [13] 卫林, 江爱良, 张翼. 论林带有效防护距离[J]. 科学通报, 1985, 36(19): 1567-1570.
- [14] Caborn J M. Shelterbelts and Microclimate[M]. Edinburgh: Edinburgh University, 1957.

(上接第 104 页)

(4) 泥石流形成流通区清水流量在高程相差 30 m 内时降低比例就达到 28.6%, 说明樟木沟流域内充足的水源补给条件除了会对两侧松散层形成冲刷并引起崩塌之外, 更是樟木镇松散层内地下水的主要补给源, 可能对樟木滑坡群稳定性有不利影响, 需引起重视。

(5) 应尽快对樟木沟进行治理, 采用固源、稳拦、停淤等工程措施与生物措施相结合的综合方案进行治理, 确保下游樟木镇和樟木口岸的安全, 为当地人民安居乐业和经济稳定增长创造良好条件。

[参 考 文 献]

- [1] 毛成文. 西藏樟木镇福利院滑坡稳定性分析与评价[D]. 陕西西安: 西安科技大学, 2008.
- [2] 中华人民共和国国土资源部. DZ-T0220—2006 泥石流灾害防治工程勘察规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [3] 八省一院小水电站网规划协作组. 推理过程线[J]. 水文, 1982(1): 29-32.
- [4] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判[J]. 铁道学报, 1986, 8(2): 74-82.
- [5] 陈国玉, 王钢城, 庄树裕, 等. 模糊综合评判法在定日县泥石流危险性评价中的应用[J]. 中国水运, 2009, 9(11): 163-164.
- [6] 张丽萍, 唐克丽. 矿山泥石流成灾度模糊综合评价: 以神府东胜矿区为例[J]. 山地学报, 2002, 20(2): 212-217.