

雪崩灾害的遥感量化分析与工程选线

陈楚江, 余绍淮, 王丽园, 张霄

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 为评估雪崩灾害对道路工程方案的影响与危害, 基于多时相高分辨率 IKONOS 卫星立体图像或机载激光雷达数据生成雪崩灾害区域高密度、高精度数字地面模型 (DEM) 与高分辨率数字正射影像 (DOM), 自动提取雪崩灾害的成灾与孕灾因子, 并进行量化动态分析, 采用层次分析法构建雪崩灾害加权评估模型, 实现工程选址及方案比选与优化设计。该方法在西藏墨脱公路的应用表明, 雪崩灾害的遥感量化分析与评估, 全面、准确地对区域雪崩灾害进行了定性定量分析, 科学、合理地确定了工程方案。

关键词: 雪崩; 高分辨率卫星图像; 激光雷达; 数字高程模型; 灾害因子; 西藏墨脱

中图分类号: P426.63+6 TP79

文献标识码: A

雪崩是积雪高山区经常发生的一种自然现象, 是一种严重的自然灾害。雪崩灾害具有季节性、突发性、潜在性、区域性等特点^[1], 往往给人类社会带来严重的影响和损失。

传统的雪崩灾害调查主要依靠野外踏勘完成^[2-3]。由于在雪崩灾害发生季节, 所在的高山地区积雪严重, 加上地形地貌十分复杂, 气候条件、交通条件、工作条件、生存条件均极度恶劣, 现场调查工作不仅难以开展, 并且要冒着极大的生命危险, 导致雪崩灾害根本无法全面调查清楚, 往往根据已有统计资料进行危险性评价^[4]。随着遥感探测技术的发展, 出现了基于遥感图像信息处理和目视经验判别相结合的人机交互解译并辅以实地验证的雪崩遥感解译方法^[5], 并用 SAR 对雪崩进行预报^[6]。但这些过分依赖于解译者的知识水平和经验积累, 往往只能对大型雪崩灾害进行简单的遥感识别与定性分析, 缺乏对工程建设更关心的雪崩灾害的孕灾环境、规模、危害程度等定量化的分析, 无法满足工程建设的需要。

为此, 作者利用多时相高分辨率 IKONOS 卫星

立体图像或机载激光雷达 (以下简称机载 LIDAR) 数据, 实现雪崩灾害的识别、信息自动提取与量化动态分析, 对雪崩灾害的稳定性、危险性及其对工程方案的危害程度进行评估, 从而科学、合理地确定工程方案。

1 雪崩灾害的遥感量化分析与评估机理

雪崩灾害的遥感量化分析与评估的机理是: 基于勘察区域的多时相高分辨率 IKONOS 卫星立体图像或机载 LIDAR 数据, 建立区域高密度、高精度数字地面模型 (以下简称高密度、高精度 DEM), 并生成高分辨率数字正射影像 (以下简称高分辨率 DOM), 自动提取雪崩灾害因子并进行量化动态分析, 构建勘察区域雪崩灾害评估模型, 进行雪崩灾害的稳定性、危险性评估。其量化分析与评估的机理图如图 1 所示。

1.1 高密度、高精度 DEM 与高分辨率 DOM

数字地面模型 DEM 是对地球表面地形地貌的一种离散的数字表达, 是表示区域 D 上的三维向量

收稿日期 (Received date): 2008-06-10; 改回日期 (Accepted): 2008-10-20.

基金项目 (Foundation item): 交通部西部交通建设科技项目 (200231800050) 资助。[The West Region Transport Development Science and Technology Program, No. 200231800050]

作者简介 (Biography): 陈楚江 (1965-), 男, 湖北蕲春, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事 3S 技术与公路 CAD 的集成研究与应用。[Chen Chujiang, male, born in Qichun, Hubei, Ph.D., Professor, majoring in the research on the integration and application of 3S and highway CAD.] E-mail: cjchen@vip.163.com

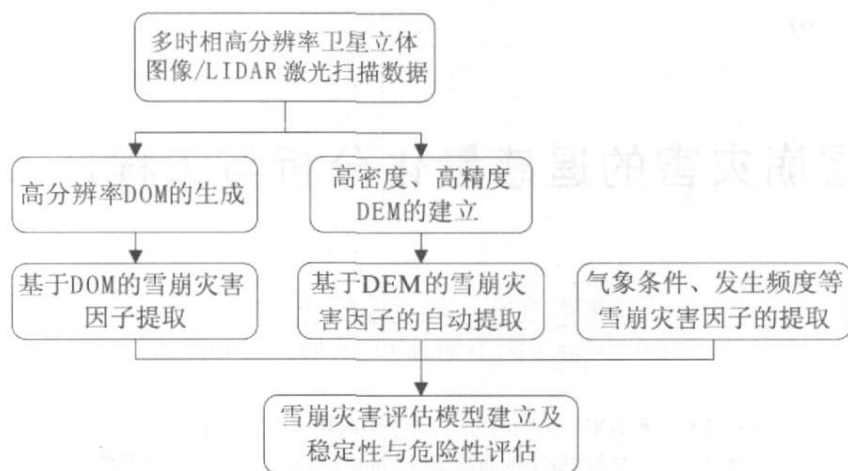


图 1 雪崩灾害的遥感量化分析与评估机理图

Fig 1 The mechanism chart of quantitative analysis and evaluation of avalanches with remote sensing

有限序列。其函数形式为

$$V_i = (X_i, Y_i, Z_i) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)^{[7]} \quad (1)$$

式中 V_i 为 DEM, X_i, Y_i 为平面坐标, Z_i 为 (X_i, Y_i) 对应的高程。

不同时相产生的 DEM, 其变化量为

$$\Delta V = V_j - V_k \quad (2)$$

式中 ΔV 为 DEM 变化量, V_j, V_k 为 j, k 时相的 DEM。

高密度、高精度 DEM 是雪崩灾害遥感量化分析与评估的重要基础。DEM 可以通过高分辨率卫星立体影像、机载 LIDAR 数据、现有地形资料数字化等方式建立。

由于地形起伏、传感器方位角等影响, 高分辨率卫星图像或 LIDAR 自身携带的 CCD 图像存在变形。为进行雪崩灾害量化分析及基于灾害的工程方案优化与比选, 必须对图像进行纠正, 形成正射投影的影像, 即 DOM。通过高分辨率卫星立体图像或机载 LIDAR 的传感器参数或姿态参数构建传感器模型^[8], 采用数字微分纠正方法, 可生成高分辨率 DOM。

1.2 雪崩灾害因子

1.2.1 雪崩灾害因子与分级

雪崩灾害孕灾环境复杂, 致灾因素众多。合理选择雪崩灾害因子至关重要。考虑到雪崩灾害的特性及其所处地质环境条件与外界诱发因素等, 将雪崩灾害因子分为 I、II 两级, 其中 I 级因子是主要因子, II 级因子是 I 级因子的子类 and 细分。

I 级雪崩灾害因子主要包括积雪条件、地形地貌特征、植被垫层、气象条件、地质条件、人类活动、

雪崩发生频度等; II 级雪崩灾害因子主要包括积雪厚度、表层纹理、雪崩类型、积雪量、积雪面积、宽度、移动方向、坡度、地形粗糙度、坡形、绝对高程、相对高差、阴坡、阳坡、坡长、植被覆盖度、植被高度、日温差、日降雪量、断裂构造、地层岩性等。

1.2.2 雪崩灾害因子提取

1. 基于高分辨率 DOM 的雪崩灾害因子提取

立体恢复后的高分辨率立体影像, 通过雪崩灾害、地质构造、地层岩性等地质现象与地质体的遥感解译标志, 可获取雪崩灾害区域地层岩性、断裂构造、植被垫层、表层纹理、人类活动等因子信息, 以及各个地质体单元的边界范围, 并可根据雪崩区的形态将雪崩划分为跳跃式雪崩、坡面雪崩、沟槽雪崩。

2. 基于高密度、高精度 DEM 的雪崩灾害因子提取

基于多时相高密度、高精度 DEM, 并通过地形曲面几何分析和流水物理模拟分析等计算, 可全自动提取雪崩灾害的绝对高程、相对高差、地理位置、坡度、坡长、坡向、地形粗糙度、坡形 (凸、凹)、阴坡 / 阳坡等地形地貌特征参数因子, 以及积雪厚度、积雪面积、积雪宽度、积雪量等积雪条件因子。

3. 其他雪崩灾害因子提取

影响雪崩灾害发生与发展的环境因子众多, 还可以通过天气预报、气象观察、历史地质灾害资料等获取气象条件 (主要包括日温差、日降雪量等)、雪崩发生频度等因子。

1.3 雪崩灾害评估模型

基于获取的各类雪崩灾害因子信息, 兼顾区域地理、地形、地貌、地质条件, 构建雪崩灾害加权评估

模型。其数学模型如下

$$R = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \sum_{j=1}^{m_i} \omega_j \cdot x_{ij} \tag{3}$$

式中 R 为雪崩灾害危险性指数; ω_i 、 ω_j 分别为 I、II 级雪崩灾害因子权重系数, 且 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$, $\sum_{j=1}^{m_i} \omega_j = 1$; n 为 I 级雪崩灾害因子个数, m_i 为第 i 个 I 级雪崩灾害因子的 II 级雪崩灾害因子个数; x_{ij} 为雪崩灾害因子的定量取值。

1. 3. 1 雪崩灾害因子权重系数

鉴于雪崩灾害危险性与危险度预测的复杂性和

雪崩灾害影响因素的多样性, 以及随机变化不稳定性的特点, 采用层次分析法 (AHP) 计算雪崩灾害因子的权重系数。层次分析法^[9]是将半定性、半定量问题转化为定量问题的有效途径, 它将各种因素系统化、层次化, 并逐步比较多种关联因素, 为分析和预测雪崩灾害提供可比较的定量依据。

通过对 I 级雪崩灾害因子采用相对尺度进行两两对比, 以判断各类因子对雪崩灾害的影响程度, 并采用 1~9 值法进行重要性取值, 综合构造判断矩阵 (表 1)。

表 1 层次分析法的判断矩阵
Table 1 The judgment matrix of AHP

	积雪条件	地形地貌特征	植被垫层	气象条件	地质条件	人类活动	雪崩发生频度
积雪条件	1	2	3	5	7	8	9
地形地貌特征	1/2	1	2	5	7	8	9
植被垫层	1/3	1/2	1	4	5	7	8
气象条件	1/5	1/5	1/4	1	5	6	7
地质条件	1/8	1/7	1/5	1/5	1	2	3
人类活动	1/9	1/9	1/7	1/6	1/2	1	2
雪崩发生频度	1/9	1/9	1/7	1/6	1/4	1/2	1

其最大特征值为: $\lambda_{max} = 7.54$ 特征向量为 (0.353 0.269 0.187 0.104 0.040 0.026 0.021)。

根据一致性指标公式

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{4}$$

计算出 $CI = 0.09$ 查表获取平均随机一致性指标 $RI = 1.32$ ($n = 7$), 根据一致性比例公式

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{5}$$

计算出 $CR = 0.068 < 0.10$, 一致性检验通过。因此, 将特征向量作为各 I 级雪崩灾害因子的权重系数。同理, 可通过层次分析法获取 II 级雪崩灾害因子的权重系数 (表 2)。

1. 3. 2 雪崩灾害因子定量赋值

根据灾害地质学、工程地质学、地貌学等知识原理, 结合区域雪崩灾害统计特征, 各个灾害因子定量赋值区间为 0~100 具体见表 3。

1. 4 雪崩灾害的稳定性与危险性评估

根据 2.3 中式 (3) 及表 1、表 2 和表 3, 得到雪崩灾害的危险性指数 R , 结合工程勘察区域雪崩灾害的发育特点, 进行雪崩灾害的稳定性与危险性评估及危害级别划分。雪崩灾害危险性分级及其特征见表 4。

表 2 雪崩灾害因子权重系数

Table 2 The weight coefficient of disaster factors

I级因子	权重系数	II级因子	权重系数
积雪条件	0.353	积雪厚度	0.434
		表层纹理	0.181
		雪崩类型	0.145
		积雪量	0.084
		积雪面积	0.072
		宽度	0.048
		移动方向	0.036
		坡度	0.442
地形地貌特征	0.269	地形粗糙度	0.158
		坡形	0.126
		绝对高程	0.105
		相对高差	0.074
		阴坡/阳坡	0.053
植被垫层	0.187	坡长	0.042
		植被覆盖度	0.583
气象条件	0.104	植被高度	0.417
		日温差	0.562
地质条件	0.040	日降雪量	0.438
		断裂构造	0.538
人类活动	0.026	地层岩性	0.462
雪崩发生频度	0.021		

表 3 雪崩灾害因子定量赋值

Table 3 The quantitative valuation of disaster factors

雪崩灾害 I级因子	雪崩灾害 II级因子	定量赋值
积雪条件	积雪厚度	积雪厚度 > 300 cm 取 100分; 30~ 300 cm 间分值在 40~ 100分间内插; 积雪厚度 < 30 cm 取 40分
	表层纹理	影像表层纹理破碎、出现裂纹等, 取 100分; 表层纹理比较粗糙取 60分; 表面光滑取 20分
	雪崩类型	跳跃式雪崩取 100分; 坡面雪崩取 70分; 沟槽雪崩取 40分
	积雪量	积雪量 > 5 000 m ³ 取 100分; 1 000~ 5 000 m ³ 在 40~ 100分之间内插; < 1 000 m ³ 取 40分
	积雪面积	积雪面积 > 25 × 10 ⁴ m ² 取 100分; 1 × 10 ⁴ m ² ~ 25 × 10 ⁴ m ² 取 50分
	宽度	宽度大于 500 m 取 100分, 否则取 50分
	移动方向	积雪移动方向朝向工程取 100分, 否则取 50分
地形地貌特征	坡度	坡度在 38° ~ 42°时取 100分; 坡度介于 25° ~ 38°或 60° ~ 42°时, 分值在 40~ 100分间内插; 坡度 < 25°或 > 60°取 < 40分
	地形粗糙度	地形平滑取 100分; 地形比较粗糙取 60分; 地形非常粗糙取 30分
	坡形	凸形坡取 100分; 凹形坡取 30分
	绝对高程	绝对高程 > 当地平均雪线取 100分, 否则取 50分
	相对高差	相对高差 > 20 m 取 100分, 否则取 50分
	阴坡 /阳坡	阴坡取 100分; 阳坡 50分
	坡长	坡长 > 100 m 取 100分, 否则取 50分
植被垫层	坡向	坡向指向工程取 100分, 否则取 50分
	植被覆盖度	地表平均植被覆盖度 ≤ 20% 时取 100分; 介于 20% ~ 60% 时在 40~ 100分间内插; 植被覆盖度 ≥ 60% 取 40分
气象条件	植被高度	地表平均植被高度 ≤ 3 m 取 100分; 植被高度 3~ 8 m 在 40~ 100分间内插; 植被高度 ≥ 8 m 取 40分
	日温差	日温差 > 20℃取 100分; 日温差 10~ 20℃间分值在 25~ 100分间内插; 日温差 < 10℃取 25分
	日降雪量	日降雪量 > 50 cm 取 100分; 30~ 50 cm 在 20~ 100分间内插; 10~ 30 cm 取 20分, < 10 cm 取 0分
地质条件	断裂构造	存在断裂构造取 100分, 否则取 0分
	地层岩性	地层岩性比较脆弱取 100分, 否则取 50分
人类活动		人类经济活动剧烈取 100分; 人类活动较少则取 40分
雪崩发生频度		平均年发生频度在 3次以上取 100分; 发生 1次以下取 0分; 否则取 50分

表 4 雪崩灾害危险性分级及特征			
Table 4 The hazardous classification of snow avalanches			
级 别	危险程度	危险性指数 (R)	描 述
I 级	强危险	> 75	雪崩灾害规模巨大且极易发生
II 级	较强危险	60~ 75	雪崩灾害规模重大且易于发生
III级	中等危险	40~ 60	雪崩灾害规模较大且较易发生
IV级	弱危险	< 40	雪崩灾害规模较小并不易发生

2 应用效果

墨脱县位于西藏自治区东南边陲, 地处喜马拉雅山东段南迦巴瓦峰 (7 782 m)和横断山、念青唐古拉山脉汇合部, 是我国迄今唯一不通公路的县。西

藏波密扎木至墨脱县城公路 (以下简称西藏墨脱公路)需要翻越岗日嘎布山脉海拔 4 300 m 以上的嘎隆拉山口, 海拔高, 常年大部时间冰雪覆盖, 冰崩、雪崩灾害严重。为减少雪崩灾害对工程的危害, 对工程勘察区域的雪崩灾害进行遥感专项调查, 并基于雪崩灾害进行道路工程方案选线与优化设计。

采用高分辨率 IKONOS卫星获取了嘎隆拉隧道工程区域积雪量较少 (2006- 01- 06)和较多 (2006- 04- 30)两个时相的立体影像 (图 2), 并获取了机载 LIDAR数据, 以此进行雪崩灾害的遥感量化分析与评估。

对每一时期的高分辨率卫星影像及机载 LIDAR数据, 分别建立能用于雪崩量化分析的高密

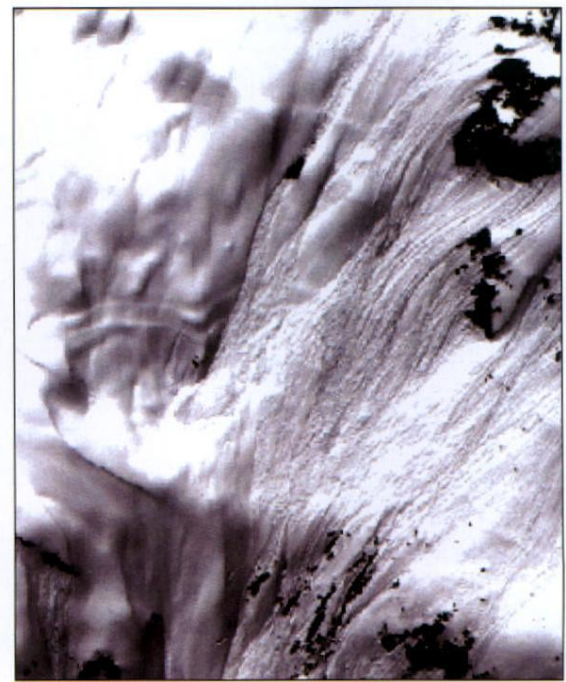
度、高精度 DEM, 并生成高分辨率 DOM。

通过雪崩灾害的遥感量化分析评估, 在工程勘察区域共发现了 113 处雪崩灾害, 其中, I 级雪崩 12

处, II 级雪崩 23 处, II 级雪崩 31 处, IV 级雪崩 47 处 (图 3)。



a. 2006-01-05 成像



b. 2006-04-30 日成像

图 2 勘察区域不同时相的 IKONOS 图像

Fig. 2 The multi-temporal IKONOS imagery

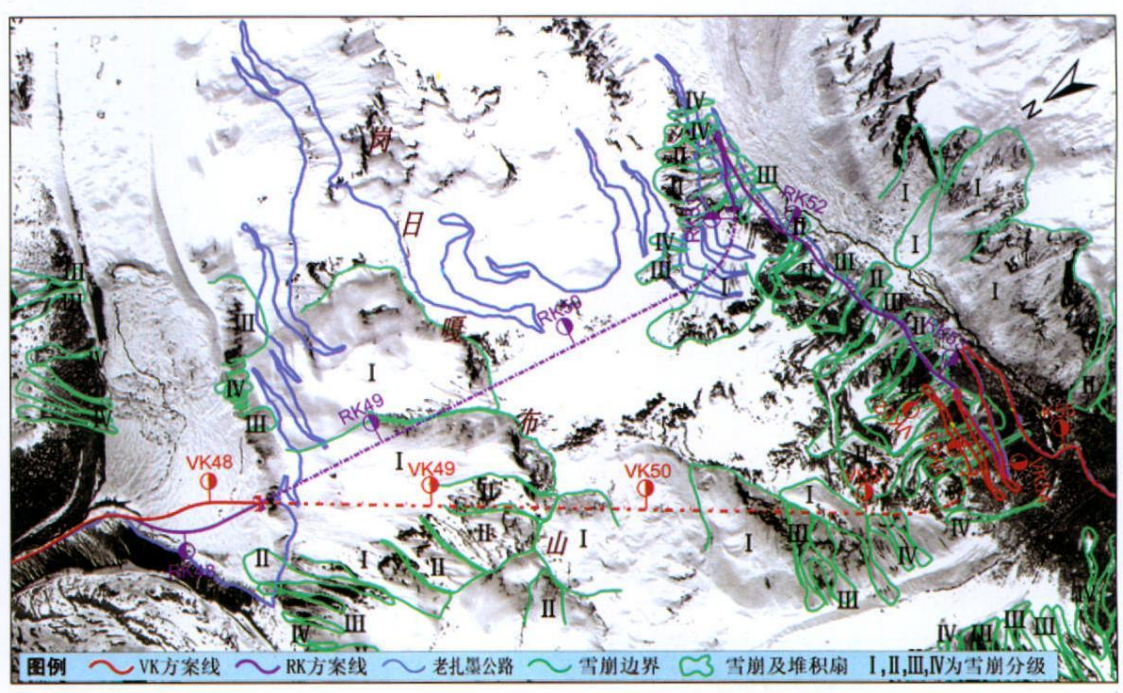


图 3 嘎隆拉隧道工程雪崩灾害遥感量化分析评估与工程选线

Fig. 3 The map of the avalanches quantitative analysis and evaluation and the route scheme selection

在雪崩灾害的遥感量化分析与评估基础上,对西藏墨脱公路嘎隆拉隧道段 VK、RK 这两个有价值的方案(图 3)进行方案比选与优化设计。工程选线与优化的原则是: 1. 对各 I 级雪崩灾害采取避让,或“早进洞、晚出洞”措施进行避让; 2. 对可能危及路线方案安全的 II、III、IV 级雪崩灾害采用“稳

(雪)”、“导(雪)”、“缓(减缓雪崩运动速度)”、“阻(雪)”等技术手段加以处治; 3. 隧道洞口应处于地表稳定、积雪少、无雪崩影响的区域。

西藏墨脱公路嘎隆拉段 VK、RK 方案雪崩灾害遥感量化分析、评估及基于雪崩灾害的工程方案选择、优化处理情况见表 5。

表 5 VK、RK 方案雪崩灾害情况表

Table 5 Statistical of the snow avalanches in VK and RK scheme

方案	I级雪崩			II级雪崩			III级雪崩			IV级雪崩		
	工程相关	避让	需防治	工程相关	避让	需防治	工程相关	避让	需防治	工程相关	避让	需防治
VK 方案	5	5	0	8	5	3	7	5	2	11	6	5
RK 方案	4	4	0	10	3	7	9	3	6	16	10	6

从表 5 可看出, VK 方案优于 RK 方案, 最终作为工程的推荐方案。VK 方案洞口选定见图 4。

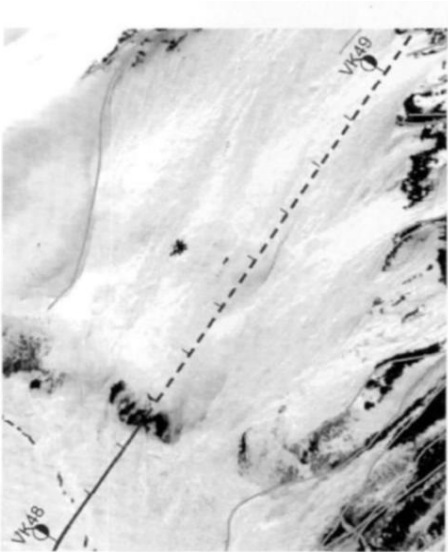


图 4 隧道洞口

Fig. 4 The tunnel entrance

3 结语

采用多时相高分辨率 IKONOS 卫星立体图像或机载 LIDAR 数据, 获取多时相高密度、高精度 DEM 与高分辨率 DOM, 进行雪崩灾害因子的自动提取与量化动态分析, 采用层次分析法构建勘察区域的雪崩灾害加权评估模型, 实现了雪崩灾害的遥感定性

与安全遭遇的危险, 而且雪崩灾害的分析与评估更加全面、准确。

西藏墨脱公路的应用表明, 基于雪崩灾害的工程方案选址及方案比选、优化, 使工程方案更加科学、合理, 避免了雪崩灾害对工程影响, 起到了减灾防灾的作用, 工程的经济、社会、环境效益更加显著。

参考文献 (References)

[1] Zhang Xiangsong, ShiYafeng. Research on ice and snow hazards in China [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1990(3), 40~45 [张祥松, 施雅风. 中国冰雪灾害研究 [J]. *地球科学进展*, 1990(3), 40~45]

[2] Casteller A., Stoeckli V., Villalba R., et al. An evaluation of dendroecological indicators of snow avalanches in the Swiss Alps [J]. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 2007, 39(2), 218~228.

[3] Ma Dongtao, CuiPeng, Wang Zhonghua. An approach on snow hazards and their countermeasures along Sino-Nepalese highway [J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(1), 59~63 [马东涛, 崔鹏, 王忠华. 中尼公路雪害及防灾对策 [J]. *山地学报*, 2002, 20(1), 59~63]

[4] Zhou Shiqiao, Xie Zichu. Categories and methods of avalanche hazard evaluation [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(2), 45~50 [周石桥, 谢自楚. 雪崩危险度评价的类型、特征和方法 [J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(2), 45~50]

[5] Zhuo Baoxi. Remote Sensing Interpretation & Application of Geology engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002 [卓宝熙. 工程地质遥感判释与应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002]

[6] Jiancheng Shi, Katkmann, R.. Effects of large structure in wet snow cover on SAR measurements [C]. *Geoscience and Remote Sensing*, 1997. IGARSS 97. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development, 1997. IEEE International

- [7] Li Zhilin, Zhu Qing. Digital Elevation model [M]. Wuhan: Wuhan Technology University of Surveying and Mapping Press, 2000 [李志林, 朱庆. 数字高程模型 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000]
- [8] Chen Chujiang, Li Deren, Zhu Qing. Research of Ikonos- 2 Positioning and Accuracy in Tibet of China [J]. *Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, (9): 782 ~ 786 [陈楚江, 李德仁, 朱庆. Ikonos- 2 在西藏的空间定位及其精度研究 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005 (9): 782 ~ 786]
- [9] Tang Hong-mei, Lin Xiao-song, Chen Hong-kai *et al.* Risk zoning assessment of geological disaster in Wanzhou area, Chongqing City [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004 (15): 1 ~ 5 [唐红梅, 林孝松, 陈洪凯, 等. 重庆万州区地质灾害危险性分区及评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004 (15): 1 ~ 5]

The Quantitative Analysis of Snow Avalanches with Remote Sensing and Engineering Scheme Selection

CHEN Chujiang YU Shaohuai WANG Liyuan ZHANG Xiao

(CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056 China)

Abstract In order to evaluate the disaster and its influence of the snow avalanches to road engineering, the disaster factors of the snow avalanche were extracted automatically, the quantitative dynamic analysis were studied, and the hazard weighted evaluation model was constructed by AHP method with high-accuracy DEM and high-resolution DOM that were generated by the multi-temporal high-resolution KONOS stereo imagery and LIDAR data, therefore, the road engineering location can be selected and the route scheme comparison and optimization can be achieved. The application to Motuo Road, Tibet of China, has shown that the qualitative and quantitative analysis of the snow avalanches in the engineering areas have been done comprehensively and accurately with remote sensing, and the schemes both the Motuo Road and its G alongla tunnel have been determined scientifically and reasonably.

Key words snow Avalanche; high-resolution satellite imagery; LIDAR; DEM; disaster factor; Motuo of Tibet