

# 应用遥测技术探讨台湾花莲地区土砂灾害集水区崩塌地的变迁

吴守从<sup>1)</sup> 谢依达<sup>2)</sup> 陈桂嘉<sup>3)</sup> 白林奇<sup>3)</sup> 陈朝圳<sup>3)</sup>

1) 实践大学观光管理学系, 台湾 84550 2) 屏东科技大学热带农业暨国际合作学系, 台湾 91201

3) 屏东科技大学森林系, 台湾 91201

**摘要** 以1996年、2002年、2005年及2007年四期SPOT卫星影像为材料,配合相关图籍数字化台湾花莲地区寿丰溪集水区与秀姑峦溪集水区的崩塌地图层,透过植生回复率(VRR)、新增崩塌率(ICR)及崩塌地重心位移的计算,探讨这两个集水区崩塌地变迁情形,并分析其环境因子特性. 研究结果显示:利用多期卫星影像数据可有效进行崩塌地长期监测,并获知其变动情形;另突发暴雨可使崩塌大量发生,显为事件直接影响因子;而VRR、ICR与重心位移的计算,可有效量化植生恢复情形及新增崩塌状况;至于地理环境特征方面,崩塌发生概率随高程增加而增加,也与坡度呈正相关,因此未来在开发上应特别注意.

**关键词** 崩塌; 遥感探测; 地理信息系统; 集水区经营

**分类号** TU 431; P 237

## Application of the remote sensing technique to monitor landslides of Hualien debris disaster watershed areas

WU Shou-tsung<sup>1)</sup>, HSIEH Yi-ta<sup>2)</sup>, CHEN Gui-jia<sup>3)</sup>, BAI Lin-chi<sup>3)</sup>, CHEN Chaur-tzuhn<sup>3)</sup>

1) Department of Tourism Management, Shih Chien University, Taiwan 84550, China

2) Department of Tropical Agriculture and International Cooperation, Pingtung University of Science and Technology, Taiwan 91201, China

3) Department of Forestry, Pingtung University of Science and Technology, Taiwan 91201, China

**ABSTRACT** The four-period SPOT satellite images of years 1996, 2002, 2005, and 2007 were used as analyzed materials, and also the relevant map data were coupled to digitize the landslide area layer of Shoufong and Siouguluan watersheds in Hualien County of Taiwan. The changed conditions of two investigated watersheds were examined and their characters of environmental factors were also analyzed through calculating the vegetation recovery ratio (VRR), the increasing collapse ratio (ICR), and the centroid displacement vector of landslide area. The result shows that it is useful to monitor landslide area and then to know their cover changed conditions over a long period of time by utilizing multi-temporal satellite images. Obviously, precipitation is the directly influential factor of causing the happenings of serious collapses, and a large number of occurrences of collapses are triggered by precipitation. The calculations of VRR, ICR, and the centroid displacement vector of landslide area can efficiently quantify the recovery of vegetation and the increasing collapse situation. Finally, the frequency of collapsing increases with increasing elevation and slope. Thus, these influential factors mentioned above have to be paid carefully attention in future developments.

**KEY WORDS** landslide; remote sensing; geographic information system; watershed management

崩塌系指环境边坡材料经风化、崩解和人为等外力作用后,受重力影响而顺着地形的坡度从山坡上掉落、滑落和滚落等现象<sup>[1]</sup>. 崩塌在山区是一种

不可避免的自然过程,常造成社会及经济的庞大损失. 因此在自然灾害减量上,崩塌的预测与防止为一关键课题,而各界亦投注许多努力在崩塌的成因

收稿日期: 2009-01-13

作者简介: 吴守从(1966-),男,博士, E-mail: stwu@msa.hinet.net

及机制上进行研究工作。

寿丰溪、秀姑峦溪是台湾花莲地区主要的土砂灾害集水区,每逢台风、豪雨经常造成山区发生崩塌或土石流等灾害,并严重危害当地居民生命财产安全,故对其进行长期监测确有必要。

偏远山区或人员不易到达之处,要进行大面积的崩塌监测,不仅旷日费时,同时难度亦高;而利用遥测技术配合相关学理,可迅速判释地表覆盖情形与崩塌分布状况,堪称是土砂灾害监测的可行方法。因此本研究以 1996 年、2002 年、2005 年及 2007 年四期 SPOT 卫星影像为材料,探讨寿丰溪、秀姑峦溪两集水区崩塌变迁及其植生恢复情形,并利用崩塌区块的重心位移向量探讨各期间崩塌扩张程度及移动方向;此外亦配合数值高程模型(digital elevation model, DEM),进行集水区内崩塌的地理环境特征分析,所得结果将有助于管理单位进行集水区土砂灾害的防治工作。

### 1 前人研究

利用遥测数据进行崩塌地监测,并用影像分析取得崩塌地图层作为依据。例如,孔德怀<sup>[2]</sup>曾以六期 SPOT 卫星影像为材料,应用常态化差异植生指针(normalized difference vegetation index, NDVI)及影像相减法,取得崩塌地的分类图层,用来进行台湾清水溪集水区崩塌地变迁特性侦测;而 Lin 等<sup>[3]</sup>则利用 1999—2001 年 6 期 SPOT 卫星影像,透过 NDVI 的变迁分析与植生回复率(vegetation recovery rate, VRR)计算,探讨台湾南投九九峰地区的崩塌区域面积变化与植生恢复情形。上述研究皆利用 NDVI 可区分植生与非植生的波谱特性,在去除裸露地后进行崩塌地分类工作,所得准确度虽在可接受范围,但其精度仍受影像质量影响,故仍需配合其他数据进行修绘,以期获得更精确的崩塌地图层。由于运用 SPOT 卫星影像进行崩塌地长期监测确实可行,故本研究亦以其为材料,配合正射航空照片,利用人工数字化方式取得精确的崩塌地图层。

除探讨崩塌地的变化状况外,评估其植生恢复情形,亦为崩塌整治决策制定与计划研拟的重要依据<sup>[4]</sup>。评估植生恢复可利用前述的 VRR 加以表示,故许多研究以其进行崩塌地植生回复监测,也均获致良好的结果<sup>[2-4]</sup>。本研究亦采用 VRR 分析寿丰溪、秀姑峦溪两集水区植生恢复情形,并在考虑植生回复与崩塌消长间必定存在某种关系后,同时探讨植生恢复与新增崩塌的关系。

进行崩塌地整治应掌握其扩张及位移状况。

Baldi 等<sup>[5]</sup>曾利用多期航空照片所制作的数值地形模型(digital terrain model, DTM)分析崩塌地区块变迁的位移向量,用来了解崩塌地的扩张速度及移动方向。本研究利用多期崩塌区块的重心位移向量,取得不同期间崩塌地的位移距离与位移方向,用来探讨崩塌地的变迁情形。

崩塌发生的原因极为复杂,Popescu<sup>[6]</sup>则将导致崩塌的因子分成地形作用、地表状况、物理因子和人为开发等四大项目。就地形因子而言,其支配崩塌的大小与行为,多数学者认为坡度陡峭的地方,崩塌概率明显增高<sup>[7-8]</sup>;降雨强度亦为引发崩塌的重要因子,当一定时间内降雨强度过大,或连续降雨超过一定时间,则崩塌发生的机会将立即大增<sup>[9-10]</sup>;另外,植生的覆盖与否亦会影响崩塌发生,植生覆盖对边坡稳定有所影响,且对降低浅层崩塌具有成效,而其变化也会改变崩塌的类型<sup>[11]</sup>;诸多研究也指出,人为开发更经常是导致崩塌发生的重要因子<sup>[12-13]</sup>,值得有关单位特别注意。

### 2 材料与方法

#### 2.1 研究区域概况

本研究以台湾花莲地区重要土砂灾害集水区寿丰溪与秀姑峦溪为研究范围(图 1)。寿丰溪为花莲溪重要支流,源自中央山脉中段海拔 3060m 的安东

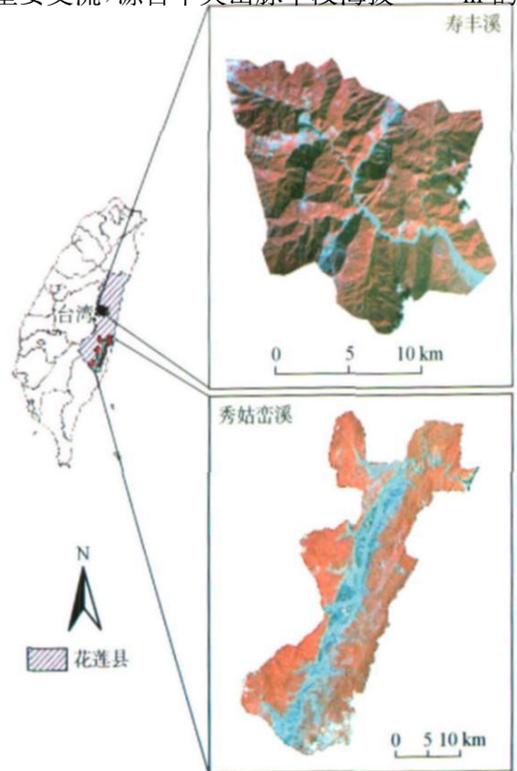


图 1 研究分区图

Fig.1 Location of the study area

军山山脉中的光头山,其上游先有怡堪溪,再有清昌溪,两溪汇入成本溪,并在下游溪口村兆丰农场东方处与花莲溪会合;由于过去寿丰溪上游山区过度伐木及采矿,致使其经常在暴雨时泛滥成灾,造成山崩、土石流与泥沙淤积,故被列为花莲县的灾害河川。秀姑峦溪发源于花莲与台东两县间的仑天山南侧,主要支流有富源溪、红叶溪、丰坪溪、卓溪和乐乐溪;秀姑峦溪全长约 81.15 km,流域面积广达 1790.46 km<sup>2</sup>,可谓台湾东部第一大河,也是形成花东纵谷冲积扇的主要河流。

## 2.2 研究材料

### 2.2.1 卫星影像数据

本研究以 1996 年、2002 年、2005 年及 2007 年四期 SPOT 卫星影像为材料(表 1),探讨寿丰溪与秀姑峦溪两处花莲县主要土砂灾害集水区崩塌地特性。

表 1 本研究所采用 SPOT 卫星影像的拍摄日期

Table 1 Filming date of SPOT satellite images

集水区	卫星影像	日期
寿丰溪	SPOT 2	1996-03-02
寿丰溪	SPOT 2	2002-01-05
寿丰溪	SPOT 2	2005-08-02
寿丰溪	SPOT 2	2007-01-30
秀姑峦溪	SPOT 2	1996-03-09
秀姑峦溪	SPOT 2	2002-01-05
秀姑峦溪	SPOT 4	2005-07-25
秀姑峦溪	SPOT 4	2007-07-19

注:2002-01-05 SPOT2 影像为同一幅。

### 2.2.2 数字元高程模型

以台湾农委会林务局农林航空测量所制作的 40 m×40 m 水平分辨率数字元高程模型数据,建立两集水区相关的高程、坡度及坡向等图层。

### 2.2.3 彩色正射航照影像

利用台湾农委会林务局农林航空测量所拍摄的 1/5 000 彩色正射航照影像,作为协助判释崩塌地及检核地真资料的参考。

### 2.2.4 其他图层数据

崩塌地部分,尚利用道路、水系图层及相片基本图作为协助判释的依据。

## 2.3 研究方法

### 2.3.1 数字化崩塌地图层

为了解研究区域崩塌地的长期变化,于是利用四期 SPOT 卫星影像为材料,配合彩色正射航照影像、相片基本图、水系与道路图层,以及必要之现场

勘查工作,以人工判释方式数字化绘制寿丰溪、秀姑峦溪集水区各期崩塌地图层,以获取集水区不同时期的崩塌地点及面积。

数字化过程以判释多光谱假色组合影像为主。由于近红外线彩色影像上的植被呈现红色,而崩塌地多呈浅蓝色及白色因此易于判释;另套迭水系图可避免将河谷地误判为崩塌地。如遇阴影部分无法判释时,则利用其他相关图层进行比对加以辨识。

### 2.3.2 崩塌地变迁分析

数字化所得图层,可利用 GIS 之空间套迭功能进行整合分析,用来获得崩塌地 1996 年—2007 年的变迁情形及其相关信息。为评估崩塌地植生恢复情形,计算各期间的植生恢复率(VRR)如下式:

$$VRR = \frac{VA_p}{CA_{p-1}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,VA 为植生回复面积,CA 为崩塌面积。

为了解各期间崩塌地新增情形,则计算各期间新增崩塌率(increasing collapse ratio, ICR)如下式:

$$ICR = \frac{ICA_p}{CA_{p-1}} \times 100\% \quad (2)$$

式中,ICA 为新增崩塌面积,p 为时期。

### 2.3.3 崩塌地重心向量移动分析

为了解崩塌地的变化距离及移动方向,乃利用 Arc GIS 软件萃取崩塌地区块的重心点位,并利用邻近分析计算各期间崩塌地区块的平均移动距离及方向来探讨崩塌地变化情形。

### 2.3.4 崩塌地地理环境特征分析

崩塌地的形成与周遭的地理环境因子有关<sup>[3]</sup>,故本研究将集水区范围的 DEM,以 3×3 网格大小的移动窗口演算高程、坡度及坡向数据。高程数据以每 500 m 为一间隔进行分级。坡度参考台湾农委会水土保持局的山坡地土地可利用限度分类标准分为六级(<5%, 5%~15%, 15%~30%, 30%~40%, 40%~55%, >55%),坡向则分为北、东北、东、东南、南、西南、西、西北八方位;所得数据结合崩塌地图层进行特征分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 集水区各时期崩塌变迁分析

为了解崩塌地变迁状况,本研究以人工判释方式,数字化寿丰溪、秀姑峦溪集水区各时期的崩塌地图层(图 2、图 3),并计算其数量、面积(表 2)。由图 2、图 3 可知,两集水区各时期的崩塌地类型差异甚大,其中寿丰溪集水区包含许多大型崩塌地,面积最大者达 1.84 km<sup>2</sup>;而秀姑峦溪集水区的崩塌地则

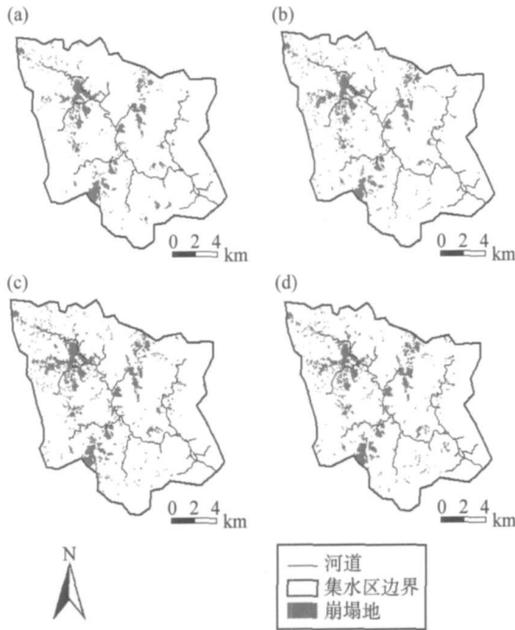


图 2 寿丰溪集水区各期崩塌地空间分布。(a) 1996 年; (b) 2002 年; (c) 2005 年; (d) 2007 年

Fig. 2 Landslide distributions throughout the Hsoufong river basin: (a) 1996; (b) 2002; (c) 2005; (d) 2007

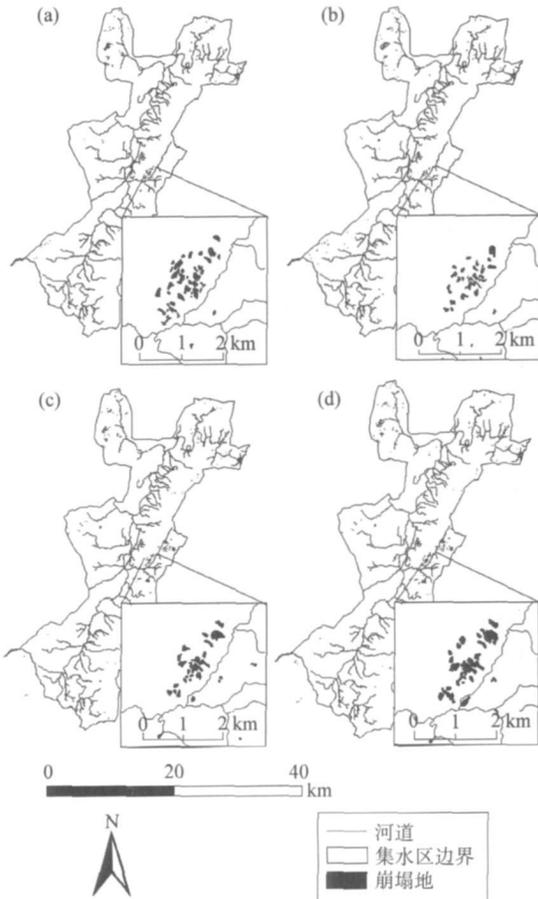


图 3 秀姑峦溪集水区各期崩塌地空间分布。(a) 1996 年; (b) 2002 年; (c) 2005 年; (d) 2007 年

Fig. 3 Landslide distributions throughout the Siougulan river basin: (a) 1996; (b) 2002; (c) 2005; (d) 2007

多属小碎块状分布。比较两集水区数据显示,寿丰溪崩塌面积为秀姑峦溪的 5 倍,但数量却只有 2 倍,显而易见两集水区崩塌地区块的类型相差甚大。

由表 2 中可知,寿丰溪集水区在 1996—2005 年,崩塌地数量与面积呈明显增加趋势,但 2005—2007 年,其崩塌地数量与面积则有下降现象,显示近年来寿丰溪集水区内某些区域已由崩塌地转变为具有植生覆盖,而其状态亦逐渐回复稳定中。秀姑峦溪集水区在 1996—2007 年间,崩塌地面积持续上升(由 2.77 km<sup>2</sup> 上升至 5.13 km<sup>2</sup>),且 2002—2007 年,崩塌地数量虽无增加,但面积仍持续扩大,显示此集水区内植生回复程度仍小于新增崩塌速度,故推测集水区仍处较不稳定状态,容易发生崩塌情形。

表 2 寿丰溪与秀姑峦溪集水区崩塌地面积变动表

Table 2 Change of collapse area in Hsoufong and Siougulan river basins

集水区	总面积/ km <sup>2</sup>	年份	崩塌地 数量	崩塌地 面积/km <sup>2</sup>
寿丰溪	211.97	1996	332	13.44
		2002	452	14.25
		2005	574	17.25
		2007	421	15.99
秀姑峦溪	710.04	1996	189	2.77
		2002	290	3.02
		2005	271	4.80
		2007	270	5.13

由于台风、暴雨所带来的临界降雨量超过坡地所能抵抗的极限时,易诱使坡地发生崩塌<sup>[10,14]</sup>,因此本研究收集台湾经济部水利署新东矿测站(寿丰溪集水区)、明里测站(秀姑峦溪集水区)1996—2007 年的雨量数据,并选取单日雨量 100 mm 以上或相邻日数累积雨量超过 300 mm 的平均暴雨量,将结果绘制成图 4 及图 5。

由图可知,1996—2007 年,寿丰溪所受暴雨强度与次数较秀姑峦溪为高,因此该集水区内崩塌地数量与面积较大,推测雨量多寡可能为重要影响因素之一。另 2002—2005 年,寿丰溪集水区新增崩塌面积为最大,推测可能引发的重要原因为南玛都台风(2004—12—03),该台风造成两天的累积雨量达 1077 mm,平均暴雨量达 538.5 mm;而 2002—2007 年,秀姑峦溪集水区无明显暴雨,故其崩塌地数量呈下降趋势,但面积仍持续增加,显而易见还有其他因素诱使该集水区崩塌面积扩大。

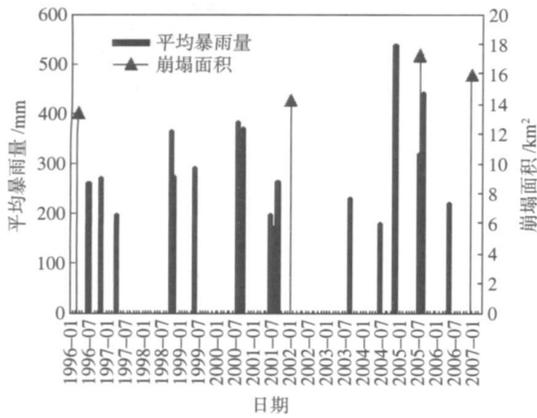


图 4 寿丰溪集水区各期崩塌面积与平均暴雨量变化

Fig. 4 Change of collapse area and mean precipitation in the Hsuefong river basin

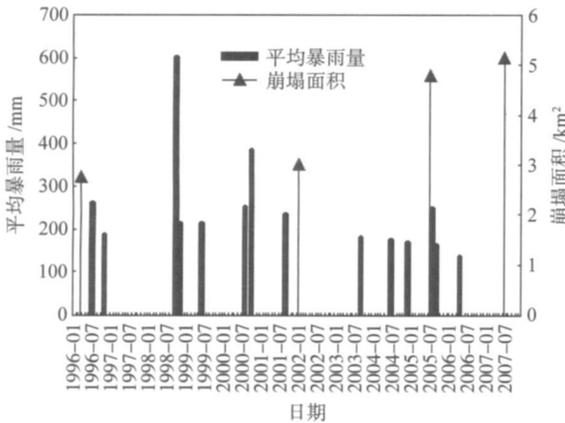


图 5 秀姑峦溪集水区各年度崩塌面积与平均暴雨量变化

Fig. 5 Change of collapse area and mean precipitation in the Siougluan river basin

### 3.2 集水区植生回复率及新增崩塌率分析

为探讨两集水区植生回复与崩塌新增情形, 分别计算其各期 VRR 与 ICR(图 6)。其结果显示, 寿丰溪集水区的 VRR 与 ICR 较低但稳定, 而秀姑峦溪集水区则较高但变化大。其中寿丰溪集水区的 VRR 及 ICR 呈彼此消长现象, 且 2005—2007 年 VRR 高于 ICR, 显示寿丰溪集水区的植生正在稳定的恢复中, 但由其较低的 VRR 与各期崩塌地空间分布状况可知, 原有的大型崩塌仍长期持续, 致使植生恢复不易; 而秀姑峦溪集水区在 1996—2005 年, VRR 及 ICR 持续增长, 表示原有崩塌地植生虽快速恢复, 但新增崩塌亦大量发生, 至 2005—2007 年, 崩塌情形趋于减缓, 故 VRR 及 ICR 都急剧下降。

Lin 等<sup>[3]</sup>分析台湾南投县九九峰地区经九·二一集集大地震后植生恢复情形, 指出灾害发生的裸露两年内没有受到人为干扰, 其植生覆盖回复率平

均最高可达 58.93%; 上述结果与本研究的 VRR 有所差异, 很明显是因为本研究区位于直接面临台风灾害的路径上, 在崩塌地植生恢复能力与暴雨、台风等因素息息相关下<sup>[3]</sup>, 长期处于高度扰动状态, 致使植生恢复受到重复崩塌影响, 导致 VRR 较低。

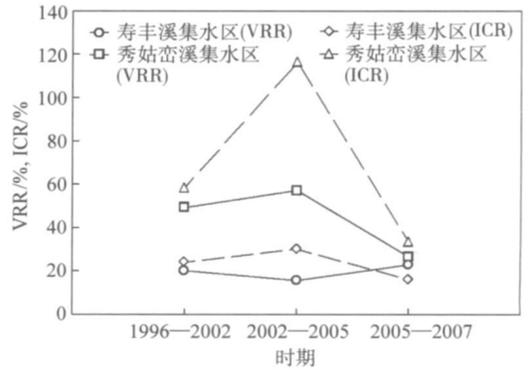


图 6 两集水区 VRR 及 ICR 变化

Fig. 6 Change of VRR and ICR in two river basins

### 3.3 崩塌地重心位移向量分析

为了解崩塌地的变迁状况, 计算两集水区各期间崩塌地区块重心向量的平均移动距离及方向, 其结果示于图 7。寿丰溪集水区三时期的崩塌地移动距离分别为 23.53 m、28.64 m 与 19.83 m, 其中 2002—2005 年的崩塌强度较大, 此时期的 ICR 较高(图 6), 而至 2005—2007 年崩塌则趋减缓(ICR 下降); 秀姑峦溪集水区三时期的崩塌地移动距离则分别为 31.80 m、43.48 m 与 25.18 m, 此变化趋势与寿丰溪集水区大致相同, 但移动距离明显较高, 显示其崩塌地变动较大, 此点由其新增崩塌及植生回复的情形可以得到验证(图 6)。

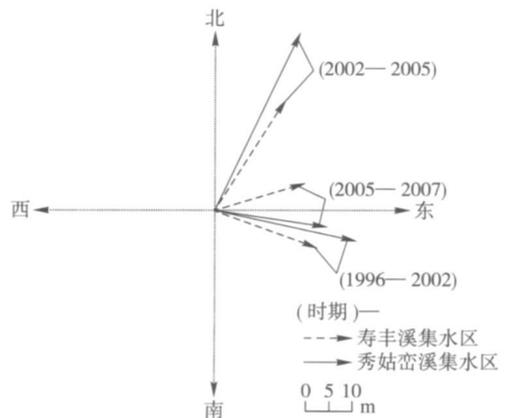


图 7 各期间集水区崩塌地重心移动向量变化

Fig. 7 Change of centroid displacement vector of landslide area in two river basins

崩塌地重心的方向变化方面, 图 7 显示两集水区各期移动方向相当一致, 可见其应具有相同的影

响因子. 1996—2002 年两集水区崩塌位移方向均为东南东, 2002—2005 年则均为北北东, 两期间位移方向产生急剧转变, 而其他数据如崩塌面积、数量和 ICR 等在 2002—2005 年也产生较大变化, 查阅台湾气象局台风资料, 南玛都台风为研究区域带来强大暴雨, 且其动作路径为通过台湾本岛南部往东北方移动, 显而易见台风路径与崩塌地的扩张距离、方向具有显著关系, 故由台风路径可推测崩塌地的位移方向. 至于 2005—2007 年寿丰溪集水区崩塌方向为东北东, 秀姑峦溪集水区则为东南东, 两者方向不同, 推测系因暴雨因素减缓时, 其他影响崩塌的

因素则可能会明显显现, 因此进一步探讨崩塌地的地理环境特征有其必要.

### 3.4 崩塌地地理环境特征分析

#### 3.4.1 高程

整理两集水区各期崩塌地之高程分布面积及崩塌率(表 3、表 4), 发现寿丰溪集水区崩塌地主要发生在 1 000~2 500 m, 而秀姑峦溪集水区则集中于 500~2 500 m, 且两者之崩塌率随高程的增加而增加, 此点与 Lin 等<sup>[3]</sup>所指出较高的海拔会有较高的崩塌率相同, 所以海拔高度确实为影响崩塌发生的重要因子之一.

表 3 寿丰溪集水区各期间高程分布面积及崩塌率

Table 3 Distribution of collapse area and collapse ratio to elevation classification in the Hsoufong river basin

海拔/m	类别总面积 (TCA)/km <sup>2</sup>	崩塌面积(CA)/km <sup>2</sup> , {崩塌率(CA/TCA)/%}			
		1996	2002	2005	2007
0~500	15.18	0.056 0, {0.37}	0.075 2, {0.50}	0.112 0, {0.74}	0.150 4, {0.99}
500~1 000	40.734 4	1.944 0, {4.77}	1.992 0, {4.89}	2.772 8, {6.81}	2.449 6, {6.01}
1 000~1 500	57.222 4	4.427 2, {7.74}	4.331 2, {7.57}	5.228 8, {9.14}	5.016 0, {8.77}
1 500~2 000	51.638 4	3.590 4, {6.95}	4.345 6, {8.42}	5.088 0, {9.85}	4.664 0, {9.03}
2 000~2 500	33.713 6	2.286 4, {6.78}	2.748 8, {8.15}	3.097 6, {9.19}	2.912 0, {8.63}
>2 500	13.499 2	0.596 8, {4.42}	0.574 4, {4.26}	0.942 4, {6.98}	0.720 0, {5.33}

表 4 秀姑峦溪集水区各期间高程分布面积及崩塌率

Table 4 Distribution of collapse area and collapse ratio to elevation classification in the Siouguluan river basin

海拔/m	类别总面积 (TCA)/km <sup>2</sup>	崩塌面积(CA)/km <sup>2</sup> , {崩塌率(CA/TCA)/%}			
		1996	2002	2005	2007
0~500	285.753 6	0.579 2, {0.20}	0.632 0, {0.22}	0.889 6, {0.31}	0.856 0, {0.30}
500~1 000	180.750 4	0.883 2, {0.49}	0.848 0, {0.47}	1.656 0, {0.92}	1.923 2, {1.06}
1 000~1 500	98.948 8	0.622 4, {0.63}	0.681 6, {0.69}	1.025 6, {1.04}	1.123 2, {1.14}
1 500~2 000	50.240 0	0.412 8, {0.82}	0.526 4, {1.05}	0.662 4, {1.32}	0.787 2, {1.57}
2 000~2 500	2 4.542 4	0.256 0, {1.04}	0.329 6, {1.32}	0.315 2, {1.28}	0.321 6, {1.31}
>2 500	9.920 0	0.025 6, {0.26}	0.030 4, {0.31}	0.049 6, {0.50}	0.019 2, {0.19}

#### 3.4.2 坡度

整理两集水区各期崩塌地的坡度分布面积及崩塌率可知(表 5、表 6), 无论任何时期, 坡度级越高崩塌面积以及崩塌率就越高, 且大部分的崩塌都发生在坡度 30% 以上. 过去有许多研究指出<sup>[4, 13, 15]</sup>, 坡度为影响崩塌的重要因子, 坡度越高则坡地越不稳定, 诱发崩塌的概率亦随之增加; 而本研究也显示, 无论是哪一个集水区, 其每一时期的崩塌率均随坡度增加而增加.

#### 3.4.3 坡向

由两集水区各期崩塌地的坡向分布面积及崩塌率可知(表 7、表 8), 寿丰溪集水区东南向的崩塌率

在各时期皆高于其他方向, 而西南向的崩塌率则明显较低, 由于东南向为受风坡面, 且本区台风以东向西入侵为主, 在台风为诱发崩塌的影响下, 本集水区东南向成为崩塌的主要坡向.

至于秀姑峦溪集水区, 其面对台风入侵路径的坡面(东北、东、东南)崩塌率亦高, 显见具有相同诱因; 但其在 2002—2005 年, 除东北向崩塌率下降外, 各方向皆急剧上升 2~5 倍, 且本时期的 ICR 暴增到 116%, VRR 亦增加到 57%, 显而易见有大量新增崩塌转移现象; 2005—2007 年, 各坡向的崩塌率仍持续攀升, 表示秀姑峦溪集水区仍处于较不稳定的状态.

表 5 寿丰溪集水区各期间崩塌地坡度分布面积及崩塌率

Table 5 Distribution of collapse area and collapse ratio to slope classification in the Hsufong river basin

坡度/(°)	类别总面积 (TCA)/km <sup>2</sup>	崩塌面积(CA)/km <sup>2</sup> , {崩塌率(CA/TCA)/%}			
		1996	2002	2005	2007
<5	36.512	0.0032, {0.09}	0.0080, {0.22}	0.0080, {0.22}	0.0064, {0.18}
5~15	5.3344	0.0544, {1.02}	0.0656, {1.23}	0.1024, {1.92}	0.0688, {1.29}
15~30	37.8640	0.7312, {1.93}	0.6320, {1.67}	0.8976, {2.37}	0.9808, {2.59}
30~40	58.2448	2.2656, {3.89}	2.3552, {4.04}	2.8672, {4.92}	2.7600, {4.73}
40~55	78.2144	5.6224, {7.19}	6.4752, {8.28}	7.4816, {9.57}	6.8928, {8.81}
>55	28.6816	4.2016, {14.65}	4.5184, {15.75}	5.8576, {20.42}	5.1744, {18.04}

表 6 秀姑峦溪集水区各期间崩塌地坡度分布面积及崩塌率

Table 6 Distribution of collapse area and collapse ratio to slope classification in the Siougulan river basin

坡度/(°)	类别总面积 (TCA)/km <sup>2</sup>	崩塌面积(CA)/km <sup>2</sup> , {崩塌率(CA/TCA)/%}			
		1996	2002	2005	2007
<5	138.3072	0.0064, {0.00}	0.0128, {0.01}	0.0384, {0.03}	0.0304, {0.02}
5~15	74.3200	0.1280, {0.17}	0.1856, {0.25}	0.2256, {0.30}	0.2512, {0.34}
15~30	150.8160	0.9648, {0.64}	0.8784, {0.58}	1.1440, {0.76}	1.3424, {0.89}
30~40	122.8560	0.7648, {0.62}	0.8624, {0.70}	1.1696, {0.95}	1.3296, {1.08}
40~55	132.9472	0.6992, {0.53}	0.8768, {0.66}	1.4352, {1.08}	1.4912, {1.12}
>55	30.9072	0.2160, {0.70}	0.2320, {0.75}	0.5856, {1.89}	0.5856, {1.89}

表 7 寿丰溪集水区各期间崩塌地坡向分布面积及崩塌率

Table 7 Distribution of collapse area and collapse ratio to aspect classification in the Hsufong river basin

坡向	总崩塌面积 (TCA)/km <sup>2</sup>	崩塌面积(CA)/km <sup>2</sup> , {崩塌率(CA/TCA)/%}			
		1996	2002	2005	2007
东北	29.4496	1.7360, {5.89}	1.8912, {6.42}	2.2336, {7.58}	2.0720, {7.04}
东	33.0208	1.7744, {5.37}	2.1168, {6.41}	2.9392, {8.90}	2.2000, {6.66}
东南	28.7840	2.1344, {7.42}	2.6448, {9.19}	3.2784, {11.39}	2.5168, {8.74}
南	24.3136	1.4528, {5.98}	1.6608, {6.83}	2.1936, {9.02}	2.0080, {8.26}
西南	23.2880	0.7360, {3.16}	0.7616, {3.27}	1.1232, {4.82}	1.0960, {4.71}
西	27.1376	1.6128, {5.94}	1.5952, {5.88}	1.8608, {6.86}	2.0560, {7.58}
西北	28.9696	2.0848, {7.20}	1.9584, {6.76}	2.0288, {7.00}	2.2704, {7.84}
北	20.4224	1.3696, {6.71}	1.4384, {7.04}	1.5840, {7.76}	1.6944, {8.30}

表 8 秀姑峦溪集水区各期间崩塌地坡向分布面积及崩塌率

Table 8 Distribution of collapse area and collapse ratio to aspect classification in the Siougulan river basin

坡向	总崩塌面积 (TCA)/km <sup>2</sup>	崩塌面积(CA)/km <sup>2</sup> , {崩塌率(CA/TCA)/%}			
		1996	2002	2005	2007
东北	82.5920	0.6240, {0.76}	0.7712, {0.93}	0.7472, {0.90}	0.8160, {0.99}
东	94.1456	0.5920, {0.63}	0.6976, {0.74}	0.6016, {0.64}	0.7264, {0.77}
东南	88.6464	0.7072, {0.80}	0.5440, {0.61}	0.7008, {0.79}	0.8224, {0.93}
南	61.3312	0.2784, {0.45}	0.2208, {0.36}	0.3088, {0.50}	0.4032, {0.66}
西南	59.1760	0.1280, {0.22}	0.1712, {0.28}	0.3952, {0.67}	0.4064, {0.69}
西	86.9408	0.0784, {0.09}	0.1888, {0.22}	0.5376, {0.62}	0.5232, {0.60}
西北	95.7376	0.1264, {0.13}	0.1200, {0.13}	0.6160, {0.64}	0.6848, {0.72}
北	68.7280	0.2384, {0.34}	0.3248, {0.47}	0.6800, {0.99}	0.6400, {0.93}

### 4 结论

本研究以卫星影像为材料,配合相关图籍数字化寿丰溪集水区与秀姑峦溪集水区的崩塌地图层,同时透过 VRR、ICR 及崩塌地重心位移的计算,分析上述两集水区崩塌地变迁情形,并探讨其环境因子特性. 研究结果显示,利用多期卫星影像数据可有效进行崩塌地长期监测,并获知其变动情形;突发暴雨可使崩塌大量发生,显为事件为直接影响因子;而 VRR、ICR 与重心位移的计算,可有效量化植生恢复情形及新增崩塌状况,同时掌握崩塌地的变化状况;至于地理环境特征方面,崩塌发生概率随高程增加而增加,也与坡度呈正相关,因此未来在开发上应特别留意.

### 参 考 文 献

[1] Ho C S. *An Introduction to the Geology of Taiwan Explanatory Text of the Geologic Map of Taiwan*. Taipei: Central Geological Survey, 1994  
(何春荪. 台湾地质概论:台湾地质图说明书. 台北:中央地质调查所, 1994)

[2] Kung T H. *Investigation of Change Detection on Landslide Characteristic—Applying Six Stage Images of Ching-Shui Stream Watershed as an Example* [Dissertation]. Taichung: Chung Hsing University, 2004:88  
(孔德怀. 崩塌地特性变迁侦测之探讨——以清水溪集水区之六期影像应用为例[学位论文]. 台中:中兴大学, 2004:88)

[3] Lin W T, Chou W C, Lin C Y, et al. Vegetation recovery monitoring and assessment at landslides caused by earthquake in Central Taiwan. *For Ecol Manage*, 2005, 210: 55

[4] Lin W T, Lin C Y, Chou W C. Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by a catastrophic earthquake: a case study in Central Taiwan. *Ecol Eng*, 2006, 28: 79

[5] Baldi P, Cenni N, Fabris M, et al. Kinematics of a landslide derived from archival photogrammetry and GPS data. *Geomorphology*, 2008, 102: 435

[6] Popescu M E. Landslide causal factors and landslide remedial op-

tions// *Proceedings of the 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures*. Singapore, 2002: 61

[7] Lin C R. *A Study on the Application of Potential Hazard Index to the Watershed Classification and Regionalization at Pingtung* [Dissertation]. Pingtung: Pingtung University of Science and Technology, 2004:95  
(林家荣. 潜在危险指标应用于屏东县集水分级分区之研究[学位论文]. 屏东:屏东科技大学水土保持学系, 2004:95)

[8] Chang J C, Shen S M, Liu Y S. A study on the occurrence of landslides and debris flows in four small catchments of the Chenyulan river. *Geogr Res*, 2001, 34: 63  
(张瑞津, 沈淑敏, 刘盈劭. 陈有兰溪四个小流域崩塌与土石流发生频率之研究. 台湾师大地理研究报告, 2001, 34: 63)

[9] Dai F C, Lee C F. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Eng Geol*, 2001, 59: 253

[10] Corominas J, Moya J. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat river basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 1999, 30: 79

[11] Thomas G. Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *Catena*, 2003, 51: 297

[12] Chen R H. Mechanism of debris flow occurrence. *Sino-geotechnics*, 1999, 74: 21  
(陈荣河. 土石流之发生机制. 土工技术, 1999, 74: 21)

[13] Chen S C, Feng J W. The application of logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Jhuoshuei river basin. *J Chin Soil Water Conserv*, 2005, 36(2): 191  
(陈树群, 冯智伟. 应用 Logistic 回归绘制崩塌潜感图——以浊水流域为例, 中华水土保持学报, 2005, 36(2):191)

[14] Chou H T. Threshold conditions of rainfall-induced shallow landslides with cracks. *J Chin Soil Water Conserv*, 2003, 34(4): 347  
(周宪德. 裂缝渗透引致浅层崩塌之临界降雨条件分析. 中华水土保持学报, 2003, 34(4): 347)

[15] Lin W T, Huang P H, Lin C Y, et al. Extracting topographic information and monitoring landscape change for the landslide caused by the 921 earthquake. *J Chin Soil Water Conserv*, 2004, 35(2): 141  
(林文赐, 黄碧慧, 林昭远, 等. 九二一震灾崩塌地特性分析及变迁监测之研究. 中华水土保持学报, 2004, 35(2): 141)