1 三维滑坡研究基础

1.1 遥感数据在滑坡研究中的应用

遥感数据以其广域性、周期性、地域无选择性等特征在滑坡灾害分析和防治中广泛使用，它可以应用于滑坡的表达、滑坡稳定性评价、滑坡防工程设计和工程治理的全过程中，并能够进行监测滑坡，是滑坡防灾、减灾的重要手段。

滑坡具有特殊的变形、运动特征，在遥感影像上表现出特定的形态，如滑坡陡坎、滑坡阶地、双沟同源、河流被滑坡体推向对岸等；斜坡变形、运动的结果使滑坡体的物理-力学性质与周边岩土体的性质产生差异，从而在遥感图像上表现出特殊的图像特征，据此可据识别滑坡。

随着图像处理方法的日益成熟，更多的遥感数据被处理为配准的、数字化的图像，从而能够定量分析滑坡，例如滑坡体周界的确定、滑坡面积量算等，也为三维滑坡模型的建立奠定了基础。

1.1.1 遥感数据图像处理方法

为突出滑坡体的特征，使滑坡更容易与周围地物区别开来，一般需要对遥感图像进行处理，滑坡遥感调查中常用的图像处理方法有：比值分析、主成分分析、去相关拉伸、卷积增强、数据融合等。

（1） 主成分分析法、

在多波段数据中，波段之间往往存在相关性，主成分分析就是在尽量不丢失原始数据信息的基础上，把原图像中所含的大部分信息用较少波段表示出来；由于人的视觉系统能同时感受的色彩仅限于三个波段（红、绿、蓝），把多波段图像数据经过主成分分析，选取 1～3 个含有主要信息的主成分，采用彩色合成方法合成彩色图像，从而显示更多的信息。

主成分分析实质上是一种线性变换，相当于原始图像数据进行空间坐标旋转，即

$$Y = TX$$

式中：X 为原始遥感数据矩阵，Y 为变换后的主组分向量，T 为变换矩阵。

主成分分析中的变换矩阵常取被变换波段之间的协方差矩阵所产生的由特征向量所组成的矩阵。

变换后的主组分分量按协方差矩阵特征值大小的顺序排列。经过主成分变换后，第一主组分取得最大的信息量，其余依次减小；一般情况下，第一、二、三主分成已集中了绝大部分信息，后面的分量所包含的信息已非常小。因此，主成分分析可在信息损失最小的前提下，减小变量（波段）数目、降低处理数据的维数，从而达到数据压缩的目的。

主成分变换第一主组分基本上反映了地物总的辐射差异，其它组分能够揭示地物的某些波谱特征，各组分之间互不相关，因此主成分分析还有减小相关、突出不同地物的作用；基于主成分分析结果进行彩色合成时，可显著提高彩色

增强效果，有助于区分岩石类型。

在主成分分析基础上可进行多重主成分分析。由于处理结果和原始数据之间仍存在一定的相关性，选取首次主成分处理结果的最有利部分和原始波段数据，再次进行主成分分析。在第一次主成分分析基础上有针对性地选择输入信息，并针对专题信息进行压缩与信息分离，可以对微弱的信息进行二次提取和增强。

（2） 卷积增强

滑坡体中与地质构造有关的线性构造、岩性边界和滑坡周界等地物在遥感图像中表现为线状特征。在数字图像处理中，线性体信息提取方法主要有：梯度阀值法、模板卷法积、超曲面拟合法、曲线追踪和区域生长技术等（丰茂森，1992）。卷积增强是简单而有效的空间滤波方法，它对突出某一方向的地质边界和线性断裂构造有明显的效果。卷积增强是一种邻域增强技术，它是一定尺寸的模板（矩阵）对原图像进行卷积来实现的。对 3×3 模板，计算公式可表示为：

$$f=\sum_{\substack{i=1\\j=1}}^{9} m_i g_i$$

式中，m_i 为模板元素值，g_i 为原始图中各像元的亮度值，f 为卷积计算结果，亦即输出像元值。此表达式相当于将模板放在每一个像元上，计算模板元素和其覆盖的像元亮度值的积。使用不同的模板元素的值，可以对不同方向的边界进行增强，如下面的模板值可分别对水平、45 度、垂直、135 度方向的线性特征进行增强。

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

(a) 水平

-2	-1	0
-1	0	-1
0	1	2

(b)45^0

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

(c)垂直

0	1	2
-1	0	-1
-2	-1	0

(d) 135^0

图 1- 1 方向模板

（3） 图像融合处理

不同类型的遥感数据反映地面特征的能力也不相同，因此滑坡研究中经常使用多种遥感数据源，这些遥感数据在时间、空间分辨率、光谱特征等方面各不相同。为了突出滑坡信息，需要利用数据融合技术。数据融合过程中使用低分辨率数据的光谱特性和高分辨率数据的结构信息，从而可以得到多种信息互补的新的遥感数据，提高遥感数据的利用率。

遥感数据融合的算法很多，如植被指数算法、缨帽变换、主成分分析、基于模型的方法等，常用的方法有：

1）基于 HIS 变换的遥感数据融合

计算机内部定义颜色系统时通常采用 RGB 系统，但在视觉上定性地描述色彩时，采用 HIS 系统更直观些。HIS 显色系统采用色调(Hue)、饱和度

(Saturation)、亮度（Intensity），RGB 空间和 HIS 空间相互转换的处理过程称之为 HIS 变换，HIS 变换实现了两套色彩系统之间的转换。两种颜色系统的转换过程中，利用图像处理技术，对某些色彩信息进行变换，可以实现图像融合，增强图像显示效果。

以 SPOT 全色波段（空间分辨率 10m）和 ETM 多光谱数据（空间分辨率 30m）的融合为例说明 HIS 变换实现遥感数据融合的过程：先把多光谱图像纠正到与 SPOT 图像相同的空间坐标中，然后对其进行重采样，使其空间分辨率与 SPOT 全色波段相同，对重新采样的多光谱图像进行 HIS 正变换，用 SPOT 全色波段替换 HIS 正变换得到的亮度分量 I，对 H、I、S 进行 HIS 反变换得到空间分辨率为 10m 的全新的 RGB 多光谱图像。

2）基于主成分分析的遥感数据融合

通过主成分分析，求得多波段遥感数据的主分量影像，把要融合的高分辨率数据与第一主分量进行直方图匹配，使其与第一主分量具有相同的直方图特征，然后用由直方图匹配得到的高分辨率数据代替第一主分量，再与其它主分量一起进行逆变换，得到融合后的遥感影像。

3）基于高通滤波的遥感数据融合

对原始遥感数据进行高通滤波，可以得到与空间信息有关的高频分量信息，同时滤掉了多光谱信息；把高频分量信息依像元加到原始数据各波段中，这样就形成了高空间分辨率信息与高光谱分辨信息融合的遥感数据(丰茂森，1992)。

4）基于小波变换的遥感数据融合

采用小波变换的方法对遥感数据进行融合的方法是：将经过重新配准的遥感数据重新采样到相同的空间分辨率，然后用小波正交变换将其分解为不同分辨率的子图，数据融合一般在分解后的高频子图像上进行。计算高频子图像上每个像点的局部平均梯度，以该象素的平均梯度为准则，确定融合后高频子图像上象素的值，以确定高频子图像的值，最后作小波逆变换，得到融合图像（朱述龙等，2000）。

1.1.2 滑坡遥感识别

滑坡由于运动、变形，形成了特有的地貌特征和色调特征，利用遥感图像资料，借助遥感图像处理方法，可以识别滑坡并对其发育的地质环境和未来的变化情况进行监测、预报。

（1）滑坡地貌遥感特征

表面形态上，滑坡常表现为弧状形态（弧形、椅形、马蹄形、新月形）、匙状形态、梨状形态、漏斗状、舌状形态、不规则形态（锯齿状、近多边形）等。滑坡与未变形、未运动的山体之间具有明显的周界，一般呈箕状，线状特征明显；滑坡体本身由于运动速度不均匀，使滑坡体下方土体受挤压，形成高低不平的地貌，低洼处常形成封闭洼地，由于洼地积水，常使滑坡体呈现较深的色调；滑坡堆积物常向外凸出，造成河流流向的突然变化。

（2）滑坡体构造特征分析

地质构造在滑坡的形成中具有重要作用，如岩体的倾向与边坡坡向相同的