5.2.4 数字高程模型

（1）滑坡发生前 *DEM* 生成

扫描数字化的 1:10 万地形图数据在 Arc/Info 下制作数字高程模型，并转换为 *GRID* 格式，空间分辨率 *20m*，滑坡及湖周边地区（范围 *30km*×*20km*）*DEM* 三维图像见

图 5- 4

DEM 的建立采用地形图矢量化的方法进行，具体过程为：

1） 地形图扫描矢量化，形成全要素的矢量地形图。

2） 地形等高线采样，形成高程样点。

3） 模型内插形成数字高程模型。

（2）滑坡发生后 *DEM* 生成

滑坡发生后，扎木弄沟和沟口的易贡藏布河段的地形发生变化，为了进行有效的三维分析，利用野外草测的滑坡地形图，结合实测 *GPS* 点生成滑坡发生-溃坝之前、溃坝之后的数字高程模型。

滑坡影响范围之外的区域，采用滑坡前的高程值，滑坡影响范围内，采用实测控制点（图 5- 2），分别就滑坡坝溃块前、后两种情况生成数字高程模型，结果见

图 5- 5。

5.2.5 三维滑坡模型

用三个时间的数字高程模型，配以各个时间的精纠正遥感影像形成易贡滑坡三维模型；并形成可视化模型，用以显示滑坡三维地形特征，并进行相关计算。

5.3 基于三维模型的易贡滑坡监测

以遥感图像和三维滑坡模型为基础，进行易贡滑坡遥感解译和三维计算。

5.3.1 滑坡发生前扎木弄沟及其周边的地貌环境

1998 年 11 月 15 日的卫星影像（图 5- 3①）显示了滑坡前约一年半易贡河下游的地貌和土地覆盖环境。易贡河及其支流在以冰川和流水为主的地质作用下，被切割侵蚀形成极高山峡谷地貌，切割深度 2000~4000*m*，在图像上中可以看出，3500~6255m 高程为积雪覆盖及冰川活动的山岭，4000*m* 以下大部分有森林覆盖，冲积扇上有农作物及居民点分布。位于峡谷底部的易贡湖盆地并不完全充满湖水，水流呈网状分布，湖的进出口高程分别为 2230*m* 及 2190*m*，盆地总面积约 26km^2，湖水面积仅约 10.7km^2。

滑坡和泥石流活动是形成该区地貌的另一个重要因素。易贡湖周边地区，特别是易贡湖下游两岸有多处大规模滑坡、泥石流沟分布。发生大滑坡的扎木弄沟为一沟床切割很深的泥石流沟，据资料（刘国权等，2000），扎木易弄沟 1900 年曾发生大滑坡，当时，滑坡堆积物堵断易贡河，形成堰塞湖，滑坡发生

10 个月后，发生溃坝。扎木弄沟沟口的喇叭形堆积扇，面积约 3.4km^2，应是此次滑坡的堆积物。

滑坡发生前，扎木弄沟流域面积约 28.8km^2，从沟头到沟口总长约 8.7km，沟的平均比降为 382‰，最陡处位于沟头以下 2000m 处，比降 641‰，图 5- 6 为在滑坡前的数字高程模型上，沿扎木弄沟切取的地形剖面。扎木弄沟沟头附近有大量裂缝、楔口、滑坡及崩塌发育，明显为危岩区。从沟口堆积扇上的植被分布及沟床深切的情况看，该沟至少在 1998 年 12 月底前处于泥石流活动的停歇期。

5.3.2 易贡滑坡遥感监测

(1) 2000 年 4 月 13 日

CBERS-1 卫星 2000 年 4 月 13 日数据处理后形成彩红外图像如图 5- 3②，显示易贡滑坡发生 4 天后的地表情况，在原扎木弄沟位置出现了流体形态的易贡大滑坡，滑坡总面积约 12.9 平方公里，其中滑坡堆积物面积 4.673km^2。滑体上不同的色调和形态反映了不同特性的滑体部位：(1)被积雪覆盖的滑体，(2)滑体上含水较多，堆积较厚部分，(3)滑体较薄部分，(4)山体被高速滑坡体运动剥蚀裸露部分。

(2) 2002 年 5 月 4 日

SPOT 卫星 2000 年 5 月 4 日的数据处理成的仿自然彩色图像如图 5- 3，表现易贡大滑坡发生 26 天后的情况，滑坡边界清楚，整体形态基本变化，但滑体北端变化较大，滑体出露面积减少到约 11.4 km^2，这是由于北端雪崩仍在进行，部分滑体被积雪覆盖的缘故。

滑坡堆积体的面积为 4.673km^2，利用滑坡发生前的 DEM 和滑坡发生-溃坝之前的 DEM 计算得滑坡堆积体的体积为 $2.4525\times10^8 m^3$。

(3) 2000 年 5 月 9 日

5 月 9 日的 CBERS-1 彩色合成图像显示滑坡发生第 30 天的面貌，滑体基本形态仍然未变，但是北端有变化，显示北端滑坡还有活动，图 5- 3③。

(4) 2000 年 5 月 12 日

TM5 图像上，滑坡体及边界清晰可见，滑坡整体没有变化，滑坡后缘基本稳定，图 5- 3④。

(5) 2000 年 5 月 20 日

在 TM7 卫星图像上，由于上游沟头部分被云层遮盖，下游滑坡坝局部被淹，滑坡堆积出露面积仅为 10.0 km^2，图 5- 3⑤。

(6) 2000 年 6 月 16 日

易贡滑坡发生后，采取了开渠泄流的工程措施，2000 年 6 月 8 日早晨，引水渠开始泄流，6 月 10 日，滑坡坝溃决（万海斌，2000）。

6 月 16 日，溃坝后第 6 天的 *SPOT* 图像显示，在滑坡坝的最低处，大致沿易贡河河道以北 100~200m 位置，坝体被冲开，滑坡堆积出露面积约为 10.6 km^2 平方公里，图 5- 3⑥，扎木弄沟整体形态无变化，但沟头部分危岩体消失。

坝体溃决后滑坡堆积则开始逐渐解体，滑坡堆积体被洪水分为两部分(图