

西藏帕里湖卫星遥感监测

王治华, 徐起德

(中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘 要: 为查明 2004 年和 2005 年夏季在中印边界附近发生的滑坡堰塞湖溃坝灾害, 采用高分辨率为主的多时相卫星图像和“数字滑坡”技术对帕里河中段从形成堰塞湖到溃坝的整个过程进行了监测。监测结果表明位于喜马拉雅山脉西段的帕里湖为高原山地萎缩湖盆, 滑坡筑坝形成堰塞湖至溃坝可分为 4 个阶段, 估算溃坝前湖面的最大高程、最大面积和最大水量分别达 3 907 m、1. 75 km² 和 6 144 × 10⁴ m³, 2005- 06- 26 溃坝的下泄洪水量为 3 738 × 10⁴ m³。预测未来汛期帕里湖下游仍然存在崩塌滑坡活动及短暂堵江形成堰塞湖的可能性, 但其规模将大多小于 2004~ 2005 年的灾害。在本次遥感监测的基础上, 定期进行遥感监测, 当帕里湖水面面积 ≥ 1. 6 km² 时, 即通知下游作好撤离等避灾准备, 是目前最经济有效的预警防灾措施。

关键词: 帕里湖; 卫星遥感监测; 数字滑坡技术; 堰塞湖溃坝; 灾害

中图分类号: P343. 3, TP79

文献标识码: A

2004 年和 2005 年夏, 位于中印边界的帕里河发生滑坡堰塞湖溃坝灾害, 灾害波及印度境内帕里河流域的村庄。中国对帕里河灾害高度重视, 西藏自治区有关部门先后派出多个工作组赴滑坡地点调查救灾, 为实施应急方案提供依据。灾情发生后, 国家遥感中心及时组织水利部遥感中心、中国科学院遥感应用研究所、国家卫星气象中心等单位利用加拿大雷达卫星 RadarSat- 1、美国气象卫星 Modis 中巴资源卫星 CBERS- 2 等遥感影像对该地区的堰塞湖水面变化情况进行监测。

中方通过外交途径多次向印方通报水文汛情。中印两国就如何解决帕里河洪灾隐患进行过多次协商, 均希望有更加详细、确切的说明帕里湖成灾过程的资料数据。为此, 根据国务院领导的指示, 国土资源部和中国地质调查局部署中国国土资源航空物探遥感中心执行卫星监测帕里湖灾害的任务。

1 自然环境概况

1.1 地理位置

帕里河发源于印控克什米尔山区, 流经我国西藏自治区西端扎达县曲松乡境内后, 跨越中印边境, 下游进入印度喜马偕尔邦 (HIMACHAL), 与司丕提河- 萨特莱杰河相连, 境内长约 152 km, 其中界河段约 12 km, 境内流域面积约 2 730 km²。帕里湖是流域内最大的湖泊, 如图 1 所示。

1.2 自然环境及交通概况

根据温度、水分条件组合等因素, 本调查区属于青藏高原的第 8 自然地理分区——阿里西部山地半荒漠与荒漠区的西部^[1]。本区位于喜马拉雅山脉西段, 区内山高谷深, 最高山峰海拔 6 790 m, 边界处帕里河谷最低为 3 000 m, 最大高差达 3 790 m。

收稿日期 (Received date): 2008- 11- 20。

作者简介 (Biography): 王治华, 教授级高工, 博导, 长期从事地质灾害与环境遥感调查, 1999 年提出“数字滑坡”概念与技术, 实现了采用遥感与 GIS 结合定位、定性、定量获取多时相灾害与环境信息的技术, 并在我国进藏交通线、三峡及藏西等区域及大型个体滑坡遥感调查监测与滑坡机理研究中获得成功应用。[Wang Zhijia, Professor, Ph.D. Advisor, be engaged in applying RS to geological disaster and environment survey and study for a long time. In 1999, she suggested “digital landslide” concept and technique that realize by using RS+ GIS to capturing the disaster and environment information with multi-temporal, qualitatively, quantificational and positioning. “Digital landslide” technique has been successfully applied for regional RS survey such as enter Tibet traffic lines region, The Three Gorge reservoir west Tibet and large scale landslide survey and study.]



图 1 帕里湖的地理位置及自然环境示意图

Fig. 1 Sketch for location and physiographical environment of the Pali Lake area

本区属高原亚寒带干旱季风气候区, 太阳辐射强烈, 干旱少雨, 年降水量约 50~100 mm, 年均相对湿度 35%~40%, 年平均气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 流域内人烟稀少, 楚鲁松杰是唯一的行政村, 区内交通极为不便, 从曲松乡需翻越 5 767 m 的波博山口才能进入帕里河流域 (见图 1)。

参考成都地质矿产研究所 (2002) 对青藏高原大地构造划分意见, 帕里河流域的区域构造部位属印度板块的喜马拉雅板片, 次级构造部位为雅鲁藏布江缝合带南支西南侧的北喜马拉雅特提斯沉积带。区内断裂及地震发育, 以抬升为主的新构造活动强烈。

2 技术方法

2.1 概述

本监测研究使用的方法为“数字滑坡”技术, 即: 地学原理与遥感及 GIS 相结合的方法。以多时相卫星遥感数据为地质环境信息源, 并使其与地理坐标配准, 制作监测区的 DEM 及正射影像, 以此为解译基础, 以人机交互方式定性、定位、定量获取多时相帕里湖基本信息, 以 GIS 存储和管理这些信息, 基于地学原理, 进行时空分析, 以了解帕里湖、监测其变化, 认识其成灾特点, 探索规律。具体工作流程如图 2。

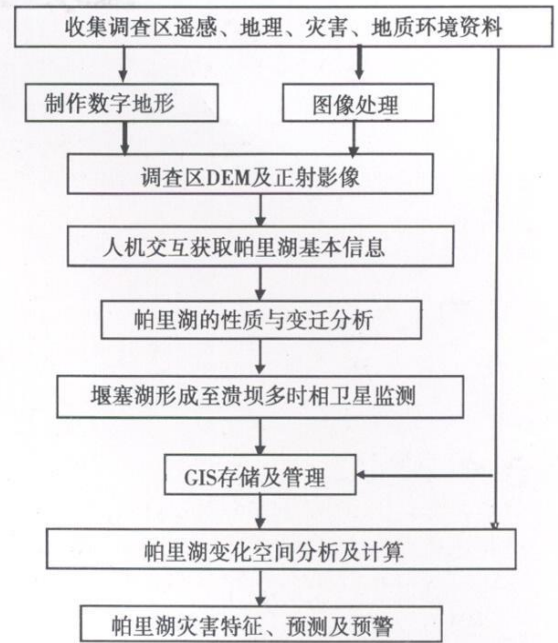


图 2 帕里湖卫星遥感监测工作流程

Fig. 2 Work flow chart of satellite remote sensing monitoring for Pali Lake

2.2 遥感信息源

采用以高分辨率为主, 结合中分辨率的 6 种类型, 18 个时相的卫星图像作为遥感信息源, 如表 1。此外还参考了滑坡发生及溃坝时间等实测数据。也参考了部分冬季的气象卫星及 MODIS 卫星图像。

2.3 地理控制信息源

对于 10~30 m 分辨率的卫星图像, 本研究采用 15 m 栅格的 DEM 及 1:5 万数字地形作为几何校正与地理配准的基础, 它们由以下三种地理控制信息源构成: ①数字化的 1:5 万地形图, 帕里河调查区范围涉及 17 幅 1:5 万标准图幅, 这些图的境外部分是根据美国早年的 1:25 万地形图放大的, 有较大误差; ②由国家地理信息中心提供的境内部分地区的 1:5 万 DEM, ③日本卫星 ASTER 立体像对。

对于 0.61~2.5 m 分辨率的卫星图像, 采用 1~5 m 栅格的 DEM 进行正射校正, 该 DEM 的信息源为美国 Obvview 卫星立体像对。此 DEM 以 Obvview 卫星的轨道参数为基准制作, 只在帕里湖附近与 1:5 万数字地形配准, 故只能保证相对精度, 其定向中误差小于 1 m。

以人机交互方法获取帕里湖基本信息及监测结果后, 空间分析与计算在 MAPGIS 和 ARCGIS 平台进行。

表 1 帕里湖卫星遥感监测使用的遥感数据及特征

卫星类型	波段特征	图像处理	接收时间
ASTER	可见光 3 个波段, 红外和短波 11 个波段及全色立体像对。	经多光谱合成及融合处理形成 15 m 分辨率的多光谱图像。	2003- 10- 01
CBERS- 2	CDD	彩色图像, 共 7 个时相	2004- 6- 15, 7- 14, 9- 4, 12- 21; 2005- 6- 14, 8- 31; 2006- 7- 10
SPOT- 5	可见光至红外的 5 个波段	经多光谱合成及融合处理形成 2.5 m、5 m 和 10 m 分辨率的多光谱图像。	2003- 08- 23~ 2003- 10- 10 的 5 景图像
Quick bird	全色及多光谱共 4 个波段。	经多光谱合成及融合处理形成 0.6 m 分辨率的多光谱图像。共 6 个时相。	2004- 09- 11, 2005- 07- 09, 2005- 08- 01, 2006- 05- 24, 2006- 08- 04, 2007- 07- 02
Orbview	全色及多光谱, 共 5 个波段。	制作 DEM 及高精度正射影像	2006- 10
ALOS	多光谱	经多光谱合成及融合处理形成 10 m 及 2.5 m 分辨率的多光谱图像, 2 个时相。	2007- 06- 19, 2007- 09- 19

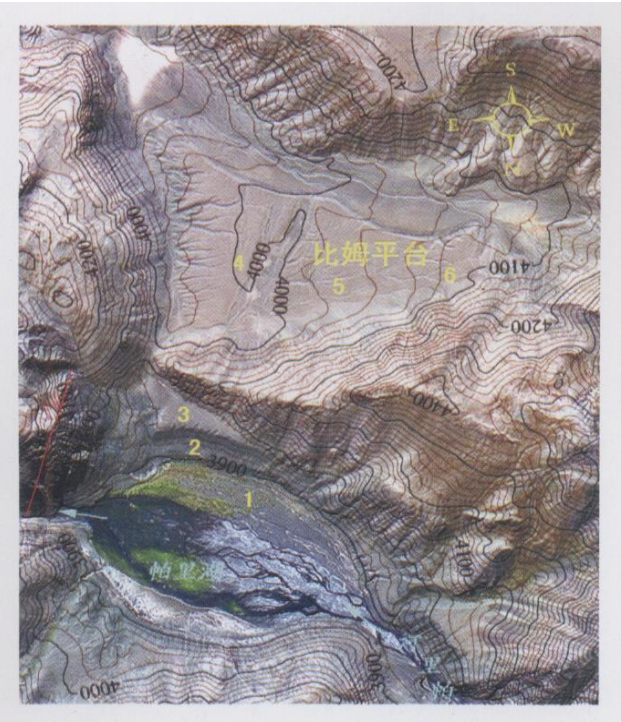


图 3 2004- 06- 22 滑坡前的帕里湖湖盆
Fig 3 PaliLake basin before land slide happened 2004- 06- 22

3 帕里湖遥感解析

在监测帕里湖灾害前首先查明帕里湖的性质。帕里湖位于帕里河中段, 流域中部 (见图 1)。2004- 06- 22 滑坡堵塞帕里河, 在滑坡坝上游帕里湖位置形成了堰塞湖。图 3 SPOT2003- 10 图像清楚地反映了 2004- 06- 22 滑坡前近于干涸的帕里湖湖床特征, 整体呈橄榄形的湖盆, 东西长度约 1.86

km, 南北宽约 1.15 km, 湖盆面积约 1.3 km²。湖盆周围为由较坚硬的二叠系变质岩组成的湖岸山体。帕里湖湖岸呈台阶状, 在海拔 3 870、3 900、3 970 m 有清楚的三级平台 1、2、3。

表 2 帕里湖各级湖盆阶地年代估算

Table 2 Estimating age for each grade lake terrace of the PaliLake				
阶地级别	平均高程 (m)	面积 (km ²)	距今年代	备注
漫滩	3 870	1.29	现代	
I	3 900	2.13	约 1 500 a	以海拔 3 870 m 漫滩为基底计算湖床年代
II	3 970	4.48	约 5 000 a	
III	4 000	6.22	约 6 500 a	
IV	4 020	7.28	约 7 500 a	
V	4 060	9.10	约 9 500 a	

在帕里湖南面有一面积更大, 群山围绕的三角形平台, 由其细腻平缓的表面推测这是一山间湖泊的湖床, 有平均高程为 4 000、4 020 和 4 060 m 的三级台阶 4、5、6。其西端有一比姆村民点, 故称为比姆平台 (湖)。

进一步分析发现, 在海拔 4 000 m 高程时, 比姆湖与帕里湖是相通的。目前表现为典型的高原山地萎缩湖泊, 推测平台 1~ 6 为湖泊漫滩及 I~ V 阶地。如前述, 本区是新生代地壳抬升十分强烈的地带, 前人的大量研究表明^[2], 近 100 万年以来, 青藏高原的抬升速率为 10~ 30 mm/a。本研究区属青藏高原西部, 其抬升速率应属较高部位, 谨慎考虑, 如以平均

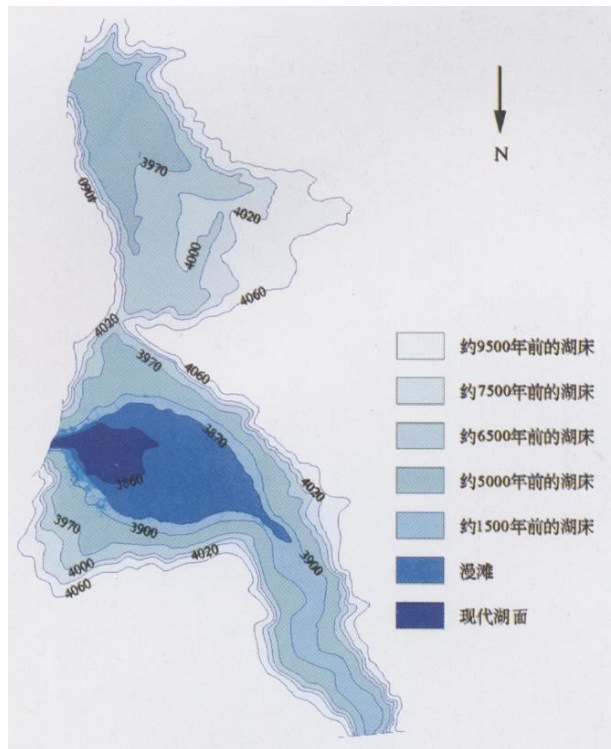


图 4 帕里湖的变迁
Fig. 4 Pali Lake's variation

每年抬升 20 mm 计,可估算出帕里湖各级阶地的年代如表 2。图 3 表 2 分析表明在约 9 500 a 前,(推测在全新世前的晚更新世)相连的比姆湖与帕里湖为一湖面达 9.1 km²的大湖,后主要由于降水(雪)减少,大量冰川后退甚至消失(帕里湖全流域卫星图像上有明显反映),湖水来源大大减少以及印度板块向东北方向俯冲使本区地壳快速抬升两大原因,造成帕里湖逐渐萎缩。至约 6 500 a 前帕里湖与比姆湖还是相通的,而后两湖分开。随着地壳抬升,帕里湖将不断萎缩,最终可能消失。以上分析确定目前帕里湖的性质为:帕里河流经的,逐渐萎缩的高原山地湖盆,有较大的潜在蓄水空间。

4 帕里湖卫星监测及堰塞湖溃坝下泄洪水量估算

4.1 帕里湖卫星监测

2004- 06- 22 帕里河中游发生滑坡,堵塞帕里河,原帕里湖成为一堰塞湖,水面逐渐升高,湖面逐渐扩大。由于水体的特殊光谱特性,以及湖面的显著几何形态,湖面面积是遥感最易获取的,也是最可靠的信息,所以以不同时相的湖面面积作为基本监

测对象,可较准确地获取湖水变化信息。图 5 为 2004- 06- 22 滑坡前后共 9 个时相的 SPOT、QUICK BIRD 及 ALOS 高分辨率正射影像上表现的堰塞湖湖面变化情况。此外,各时相湖面正射影像与 DEM 叠加可求出该湖面的高程。表 3 为在 MAPGIS 平台计算的这 9 个时相的帕里湖面面积值。

表 3 2003~ 2007 帕里湖湖面面积变化
Table 3 The variation of the Pali Lake surface area during 2003~ 2007

监 测 时 间	湖 面 面 积 (m ²)	监 测 时 间	湖 面 面 积 (m ²)
2003- 10- 10	858 093. 88	2006- 08- 04	1 125 469. 50
2004- 09- 11	1 619 585. 41	2009- 09- 15	1 114 553. 90
2005- 07- 09	1 165 572. 50	2007- 02	1 115 431. 83
2005- 08- 01	1 155 197. 27	2007- 09- 19	1 115 431. 83
2006- 05- 24	1 170 639. 60		

4.2 溃坝灾害前后帕里湖湖面变化分析

以图 5 所示 9 个时相的高分辨率图像为基础,加上 CBERS- 2 卫星的 6 个时相数据及 MODIS 数据,结合西藏自治区实地考察获得的滑坡发生及帕里湖溃决时间,共计 20 余个时相,形成如图 6 的帕里湖湖面变化曲线。

该曲线反映了从 2004- 06- 22 滑坡发生前到滑坡坝堵江形成堰塞湖到溃坝成灾直至恢复稳定的卫星监测帕里湖全过程。滑坡前,2003- 10- 10 帕里湖水面面积约为 0.86 km²,该面积可看作帕里湖进入旱季时的水面,次年,2004- 06- 15(汛期),湖面升高扩大至 1.13 km²,6 月 22 日湖口下游发生滑坡并堵河后,湖水开始逐渐上涨,22 d 后,2004- 07- 14 卫星数据显示湖面仅略扩大至 1.14 km²,而后开始快速上涨,滑坡 53 d 后,8 月 14 日湖面上涨到近 3 900 m 高程,扩大至约 1.62 km²。高水位一直维持到 2005- 06- 26 溃坝,溃坝后 2005- 07- 02、07- 09、08- 01 的卫星图像表明,湖水位下降,湖面已到达 1.17 km²至 1.16 km²,接近正常水面。实测溃坝前水位为 3907 m,溃后水位 3 883.5 m(表 3)。

以上曲线分析得出帕里湖形成堰塞湖到溃坝有以下规律:1)帕里湖的正常水位及预警水位湖面面积:帕里湖旱季的正常湖面面积约为 0.86 km²,汛期正常湖面面积约为 1.10~ 1.20 km²,≥1.6 km²为灾害预警湖面面积;2)滑坡堵河到溃坝可分为 4 个阶段:①滑坡堵塞帕里河至水位快速上升前,2004- 06- 22~ 2004- 07- 14 湖面面积变化在 0.86~ 1.14

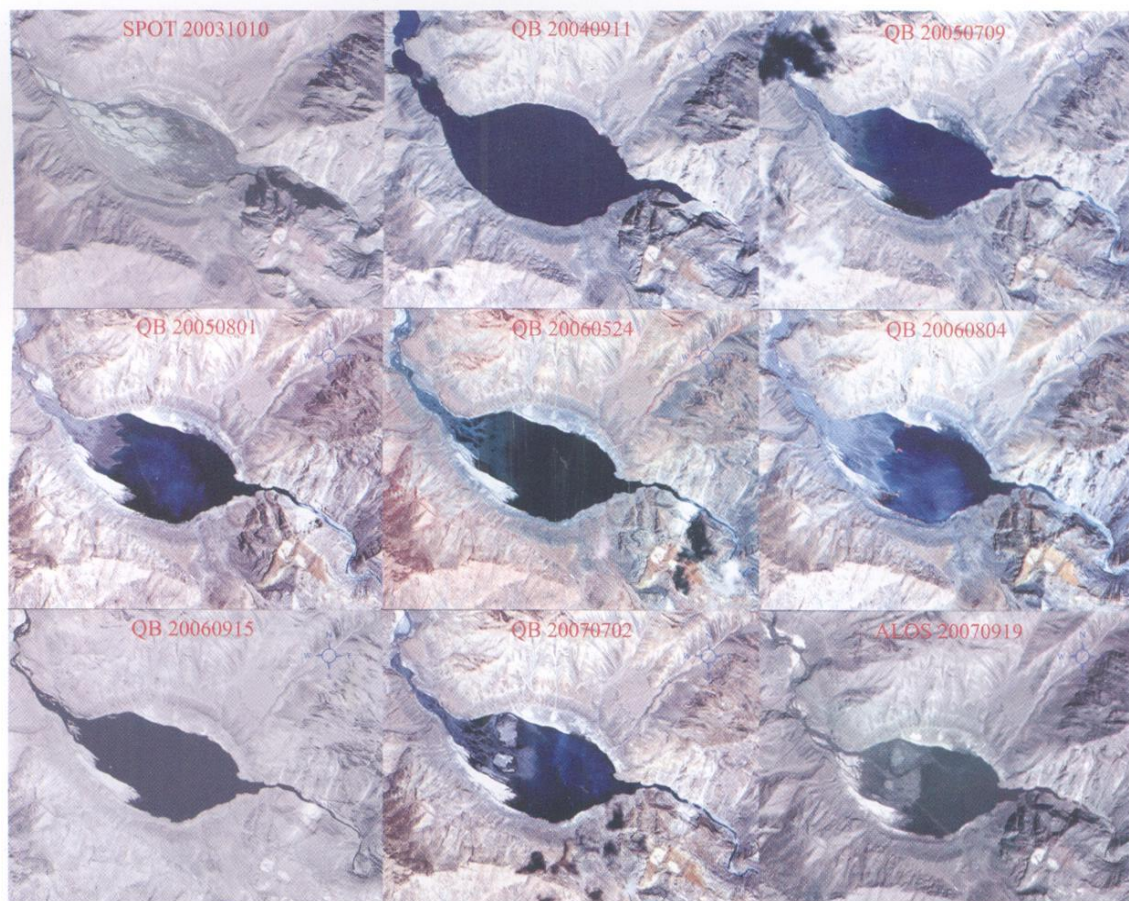


图 5 2003 ~ 2007 年帕里湖面变化高分辨率卫星监测示意

Fig. 5 High resolution satellite monitoring the Pali lake

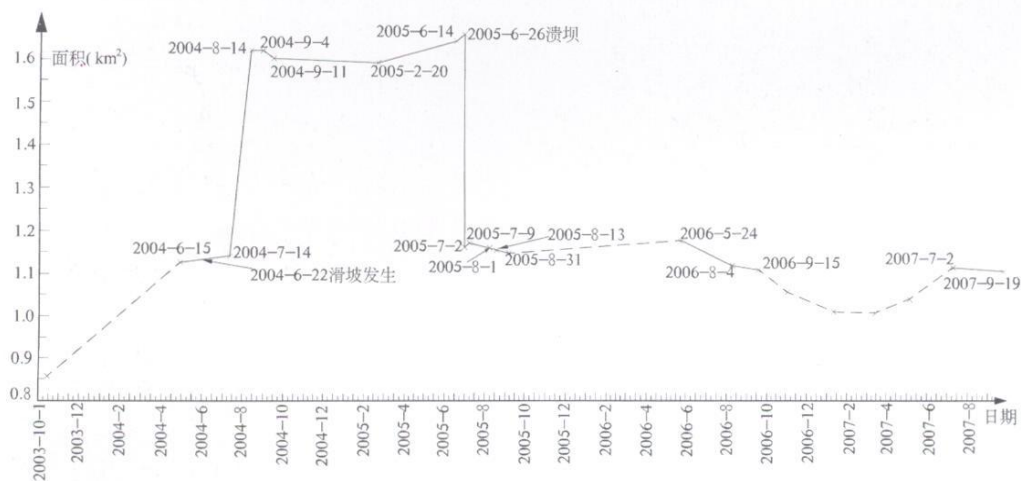


图 6 2003 - 10 - 01 ~ 2007 - 09 - 19 帕里湖面变化高分辨率卫星监测示意

Fig. 6 The change of lake area from high resolution satellite monitoring

km², 也即, 滑坡堵河后 22 d 湖面才开始快速上升扩大; ②湖水快速上升阶段, 2004-07-14~2004-08-14, 湖面由 1.14 km² 扩大到 1.62 km² 经历了 31

d ③湖面维持高位阶段, 2004-08-14~2005-06-26 3900~3907 水位, 1.60~1.75 km² 的湖面维持了 10 个月另 10 d ④溃坝, 2005-06-26~2005

- 07- 02 大约 7 d 时间湖水下泄恢复到正常湖面。

卫星监测表明滑坡发生后 22 d 湖水才从正常水位开始上涨, 53 d 才到达高水位。由于帕里湖的上游来水量较小, 有足够大的湖盆, 且高水位将会维持一段较长的时间, 以湖面 1.6 km^2 为预警水位, 下游村庄是来得及作避灾防灾准备的; 自 2005- 06- 26 溃坝后, 帕里湖总体稳定, 除非发生新的堵河事件, 帕里湖暂不会对下游造成灾害。

4.3 堰塞湖溃坝下泄洪水量估算

帕里河堰塞湖溃坝洪水下泄是造成下游灾害的主要原因, 求取这次下泄水量是遥感监测结果分析计算的主要任务。

图 7 左图为滑坡前的帕里湖湖盆, 其水面为 3 870 m 高程, 右图为滑坡后堰塞湖的 3 900 m 高水位。在 MAPGIS 平台上利用空间分析中的 DTM 分析的求蓄积量功能, 输入帕里湖的 *grd* 文件, 代入求取的高程值后便可自动计算不同高程帕里湖的水量, 结果如表 4 所示。

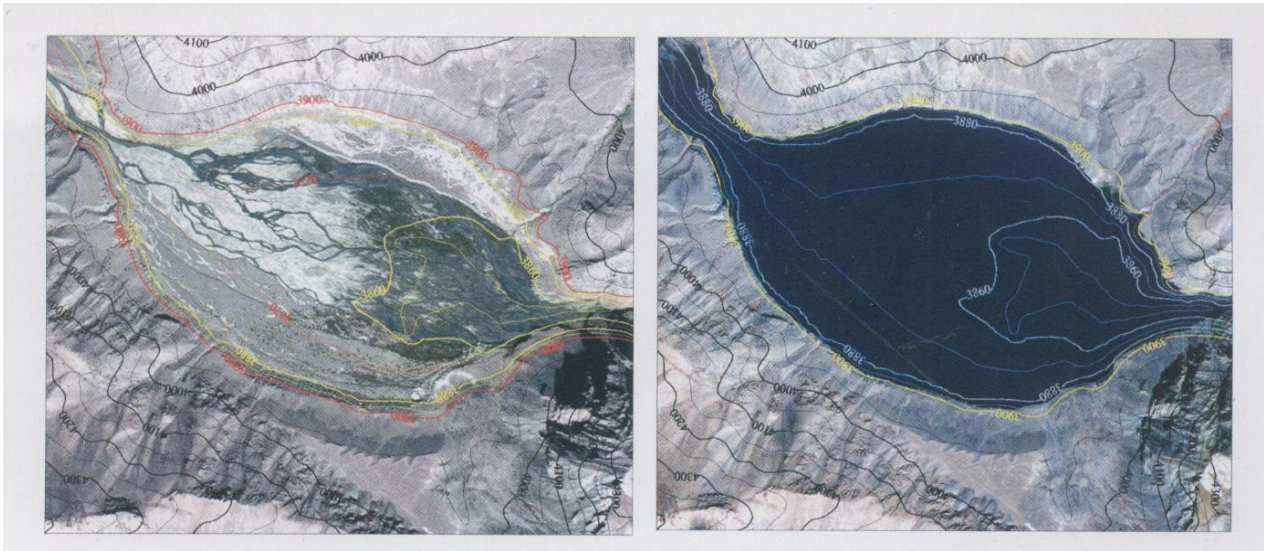


图 7 2004- 06- 22 滑坡前后帕里湖正射影像与地形线的套合示意

Fig 7 Sketch for combination of ortho- photo and contour line of Pali Lake before and after 22/06/2004

表 4 空间分析求帕里湖各水面高程时的湖水量

Table 4 Water capacity of the Pali Lake in different surface elevation got by spatial analysis

湖水位 (m)	湖面积 (km^2)	蓄积量 (m^3)
3 907	1. 75	61 443 163
3 900	1. 62	49 742 540
3 883. 5	1. 49	24 015 357
3 875	1. 16	12 362 268
3 870	0. 86	7 358 240

由该不同高程的蓄水量便可计算出从某一水位降至另一水位时的下泄水量: ①水位从 3 907 m 降至 3 883. 5 m 时 (实测水位), 泄出水量约 $3\,743 \times 10^4\text{ m}^3$; ②水位从 3 900 m 降至 3 875 m (卫星监测数据) 时, 泄出水量约 $3\,738 \times 10^4\text{ m}^3$ 。卫星监测结果与实测高程的泄水量计算结果相近。

2004- 06- 22 滑坡堵江形成的堰塞湖与原旱季帕里湖正常水量比较增加的最大水量约为 $5\,400$

$\times 10^4\text{ m}^3$, 与汛期相比增加的最大水量约为 $4\,908 \times 10^4\text{ m}^3$ 。

5 帕里湖灾害特点及预警

5.1 2004~ 2005 帕里湖灾情及特点

如前述, 2004~ 2005 帕里河因滑坡堵坝造成的堰塞湖溃坝前的最高水位、最大湖面积及溃坝下泄洪水量分别为 3 907 m、 1.75 km^2 和 $3\,738 \times 10^4\text{ m}^3$ 。据“2004 年西藏阿里地区地质灾害应急调查报告”, 堰塞湖溃坝造成的灾情大致为: 下游 (楚鲁松杰) 水位上涨约 4 m, 冲毁、淹没农田、林木、人工草场、果树共计约 20 hm^2 , 冲跨小桥 4 座。对受威胁居民、卫生所和学校进行了及时转移, 没有发生人员伤亡。

帕里湖溃坝在下游造成的灾害有二个特点: ①溃坝洪水在下游可能接纳更多的水量, 图 1 可见帕里河水系的特征是帕里湖以下为树枝状水系, 两岸

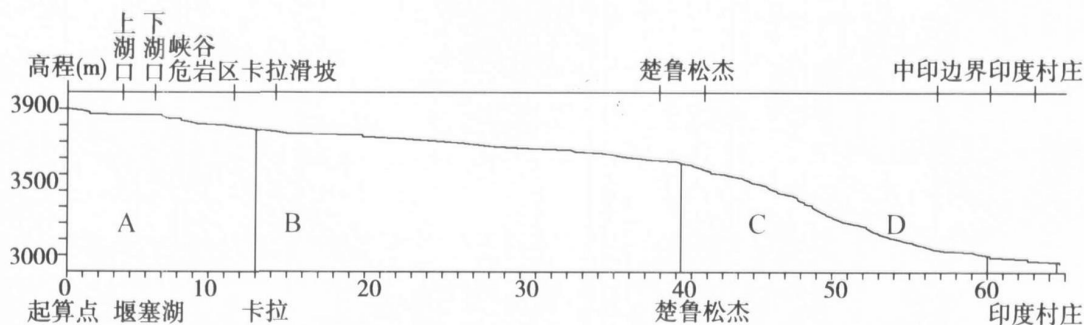


图 8 堰塞湖至中印边界的帕里河比降示意图

Fig 8 Sketch for gradient of the Pali River from barrier lake to Sino-India boundary

均有 4 条 10~40 km 长的支流分布, 其次级支流均伸入 5 700~6 700 m 以上的终年积雪区, 汛期有较多溶雪水进入各次级支流, 再逐级进入帕里河干流; ②楚鲁松杰以下的灾情可能较其上游近溃坝处更严重, 如图 8 所示, 帕里河河谷自堰塞湖向下游经过中印边界至印度最靠近边界的一个村庄, 沿河距离约 64 km, 高程由 3 900 m 下降至 2 970 m, 可分为四段: A—帕里湖盆及危岩段, 平均比降约 9‰; B—卡拉滑坡至楚鲁松杰村段, 平均比降约 8‰; C—楚鲁松杰村至中印边界, 平均比降约 32‰; D—印度境内, 比降约 9‰, 所以楚鲁松杰村至中印边界段两岸尽管离帕里湖较远, 但溃坝洪水汇合支流来的水量, 再加上 32‰ 的河床坡度提供的水动力, 使该段的灾害必然更加严重, 也可能会波及境外的印度村庄。

5.2 帕里湖灾害预测

帕里湖今后是否再次成灾, 灾害的规模有多大? 是本研究关注的主要问题。由于帕里湖为一处于干旱荒漠地带的高原山地萎缩湖盆, 上游来水量有限, 地质灾害分布较少^[3] 所以其成灾及规模主要取决于湖下游发生崩塌滑坡灾害并堵塞帕里河的可能性及其规模, 堵江及溃坝的速度。

帕里湖下游 8 km 为帕里河的峡谷危岩段和特大型卡拉滑坡宽谷段。河谷两岸岩层破碎, 断裂发育。在峡谷段共有 10 处危岩分布^[3], 汛期随时可能出现崩塌滑坡活动及短暂堵江形成堰塞湖, 但规模将大多小于 2004~2005 年的灾害, 这是因为: ① 2004-06-22 滑坡-危岩 1 为一规模达 $60 \times 10^4 \sim 70 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高速顺层基岩滑坡, 并恰位于帕里湖下游河口附近, 且是瞬间堵断帕里河的, 由于高速滑动时已充分释放势能, 滑体物质已基本完全下滑到河床^[4], 故近期内难以再形成这样大规模的滑坡; ②研究认为危岩 1 下游的 9 处危岩虽规模不一但大

多处于局部活动状态, 在汛期随时可能堵河, 但其规模大都为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右及以下的小型暴发, 较易在短时间内被河水冲开, 且大都属于缓慢溃坝, 难以形成如危岩 1 的活动, 与危岩 1 相邻的上游断层破碎带的松散堆积物质活动可能引起短暂堵河, 需关注, 但难以形成与危岩 1 同等规模及活动特征的活动; ③下游 5 km 以外的卡拉滑坡规模巨大, 但整体下滑堵江的可能性几乎不存在, 其前缘活动频繁, 但规模均在 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以下, 2005~2007 年 3 a 汛期的卫星监测表明其下滑及塌岸的速度均较低。

综上所述近年内再发生如 2004~2005 规模的堰塞湖溃决灾害的可能性很小, 但并非没有可能, 毕竟帕里湖处在一个新构造运动强烈, 坡岸岩层破碎、断裂发育的区域, 所以预警措施还是必要的。

5.3 帕里湖灾害预警

2004-06-22 帕里河滑坡形成堰塞湖而后溃坝的灾害是一场难以避免的自然灾害, 由于进入帕里河流域十分困难, 不适于地面调查或采用任何工程措施来防治, 人为的工程(如爆破等)可能触发更多更大的地质灾害。目前较经济有效的方法是在本次遥感调查监测的基础上, 定期进行遥感监测, 当帕里湖水面积 $\geq 1.6 \text{ km}^2$ 时, 即通知下游作好撤离等避灾准备, 减少灾害损失。如在帕里湖设立水文站, 汛期观测水位, 当水位接近 3 900 m 时, 即向下游村民预警, 虽有一定难度, 但也是一项有效措施。

6 结语

1 2004-2005 夏季溃坝成灾的帕里湖为帕里河流经的, 逐渐萎缩的高原山地湖盆, 有较大的潜在蓄水空间。

2 2004-06-22 滑坡发生后, 22 d 湖水才从正

常水位开始上涨, 53 d 才到达高水位, 可见帕里湖上游的来水量是较小的, 以湖面 1.6 km^2 为预警水位, 下游村庄是来得及作避灾防灾准备的; 自 2005-06-26 溃坝后, 帕里湖总体稳定, 除非发生新的堵河事件, 帕里湖暂不会对下游造成灾害。

3. 2004~2005 帕里河因滑坡堵坝造成的堰塞湖溃坝灾害是一场难以避免的自然灾害, 由于帕里河的水系结构及河床比降特征, 溃坝时楚鲁松杰至中印边界段受灾较重, 也可能波及下游印度村庄。

4. 在本次遥感调查监测基础上, 今后定期进行遥感监测, 当帕里湖水面面积 $\geq 1.6 \text{ km}^2$ 时, 即通知下游作好撤离等防灾准备, 是目前最经济有效的预警防灾措施。

参考文献 (References)

- [1] Zheng Du. Qinghai-Tibet Plateau China[M]. Beijing: China Science Press, 1985 [郑度. 中国的青藏高原[M]. 北京: 科学出版社, 1985]
- [2] Wu Zhenhan, Hu Daogong, Wu Zhonghai. Active Faults and Induced Geological Disasters in the Middle Section of Qinghai-Tibet Plateau China[M]. Beijing: Geo-Science Press, 2005 [吴珍汉, 胡道功, 吴中海. 青藏高原中段活动断层及诱发地质灾害[M]. 北京: 地质出版社, 2005]
- [3] AGRS. Project Report of RS Investing and Monitoring Landslides in the Pali River of Tibet China[R]. 2006 [中国国土资源航空物探遥感中心, 西藏帕里河滑坡遥感调查与监测成果报告[R]. 2006]
- [4] Wang Zhihua, Xu Qide. Satellite monitoring 2004-06-22 landslide in the Pali River of Tibet China[J]. *Geoscience*, 2008, 22(2): 281~287 [王治华, 徐起德. 西藏帕里河 2004-06-22 滑坡卫星监测[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 281~287]

Satellite Remote Sensing Monitoring for Pali Lake of Tibet, China

WANG Zhihua, XUE Qide

(China Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land use and Resources-AGRS, Beijing 100083 China)

Abstract for investigating the disaster occurred near the boundary of China-India in Summer 2004~2005, taking multi temporal high resolution satellite data as the main information resources and adopting "Digital Landslide Technique" the process from the Barrier Lake formed to burst in the middle reach of the Pali river Tibet have been monitored. The monitoring results show the Pali lake is an atrophic lake basin in Qinghai-Xizang Plateau Mountain, the process can be divided into 4 steps. The highest level, largest water area and biggest impoundment of the barrier lake before bursting are estimated are 3 907 m, 1.75 km^2 and $6.144 \times 10^4 \text{ m}^3$, and the burst flood is calculated as $3.738 \times 10^4 \text{ m}^3$. It is forecast that rock fall and landslide activities distributed in the lower reach of the lake will occur and blockage the river channel at any time of the rain season, but their scales would be smaller than the disaster occurred in 2004~2005. Routine remote sensing monitoring will be the most reasonable and effective measures for disaster pre-warning in this high mountain narrow canyon area of the Himalaya, that while the water surface $\geq 1.6 \text{ km}^2$, the villager lived in the lower reach will be immediately informed and asked doing something to avoid disaster.

Key words the Pali lake satellite monitoring, digital landslide technique, Barrier Lake bursting disaster