

中印边界附近帕里河上的滑坡灾害遥感调查

王治华, 徐起德, 杨日红, 齐泽荣

中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083

[摘要] 2004 年 6 月 22 日中印界河—西藏帕里河右岸发生滑坡, 滑坡堵塞帕里河形成堰塞湖, 随后堰塞湖坝体溃决, 下泄洪水对下游的中国境内和境外印度村庄造成一定损失。“西藏帕里河滑坡遥感调查”项目组采用高中分辨率相结合的 6 种类型共 13 个时相的卫星数据, 以滑坡地学原理为基础, 以遥感、地理信息系统与空间定位技术集成的数字滑坡技术对帕里河滑坡灾害进行调查与监测。查明灾害性质为中型快速滑坡, 遥感监测表明滑坡整体已滑入河中, 该部分斜坡暂时稳定, 仅右上侧有少量滑落。查明堰塞湖所在湖盆原为帕里河流经的、逐渐萎缩的高原湖盆, 遥感监测了其形成堰塞湖直至溃决的过程。分析表明帕里河如再次堵江溃决, 可能受灾的是下游我国境内的卡拉村及楚鲁松杰村, 也会在印度造成一定危害。下游村民防灾应以避让为主。

[关键词] 帕里河; 滑坡; 堰塞湖; 遥感调查

[中图分类号] P236, P237

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)06-0027-05

Remote Sensing Survey for a Landslide Disaster in the Boundary River Between China and India

WANG Zhihua, XU Qide, YANG Rihong, QI Zerong

China Aero-Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land Use and Resources, Beijing 100083, China

Abstract: On 22nd June 2004, a landslide disaster occurred in the right bank of the middle reach of the Pali River, a boundary river between China and India. The landslide blocked the Pali River and formed a barrier lake, then, with the dam broken, flood discharged and destroyed villages in China and India near the boundary. AGRS organized "the landslide of the Pali River satellite remote sensing survey" program. With a total of 13 temporal satellite data of 6 types as the data resources, based on "digital landslide" technique, which combines the landslide principle and integrates RS with GPS and GIS, the disaster survey and monitoring is carried out. It is shown that the disaster was caused by a middle scope rapid rock landslide. Two years' monitoring indicates that the whole of 2004-6-22 landslide body has already fallen down to the Pali River and the bank slope where the landslide occurred is now basically stable with only a few upside rock slip. Remote sensing ascertained that the original place of barrier lake was an atrophic lake basin of scale now of 1.3 km². The entire process from formation of the barrier lake to the lake burst has been monitored by remote sensing. It is predicted that if the Pali River should block again, the Kala and Chulushongjie villages in China will be mostly affected and some villages in India near the boundary may also be affected, so the lower reach villages should seek refuge to avoid the disaster.

Key Words: Pali River; landslide; barrier lake; remote sensing investigation

CLC Numbers: P236, P237

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)06-0027-05

收稿日期: 2007-02-02

基金项目: “地质大调查”项目 (1212010640703)

作者简介: 王治华, 女, 中国国土资源航空物探遥感中心, 教授级高级工程师, 中国科学院遥感应用研究所兼职研究员, 主要研究方向为灾害与环境地质遥感; E-mail: wzh@agrs.cn

0 引言

2004 年和 2005 年夏,位于中印边界附近的帕里河发生滑坡坝溃决灾害,据“西藏自治区札达县帕里河堰塞湖溃决灾害应急调查报告”“2004 年 6 月 22 日,西藏自治区札达县曲松乡楚鲁松杰村上游帕里河(39°19'13" N, 78°44'03"E)发生山体崩塌,造成河流堵塞形成堰塞湖;2005 年 6 月 8 日,堰塞湖左岸山体再次发生崩塌,堵塞原坝溢流口,湖面水位上升;6 月 26 日 10 时,堰塞湖坝体发生溃决,下泄洪水量达 2 420 余万 m^3 ,给楚鲁松杰村带来了巨大的损失且灾害波及印度境内帕里河流域的安全。”

灾情发生后,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抢险救灾及实地考察。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、中巴资源卫星 CBERS2 等遥感影像对该地区进行连续监测。

中方通过外交途径多次向印方通报水文汛情,并建议印方提前做好必要的防灾准备。自 2004 年 8 月起,中印两国就如何解决帕里河洪灾隐患进行协商,并在北京就水资源合作问题进行了中印副部级会谈。双方就帕里河堰塞湖问题及跨界河流报汛事宜进行了积极和富有成效的会谈。中国总理温家宝与印度总理发表的“联合声明”中,明确提到了帕里河的问题。该声明第 9 条称“为回应印方关切,中方同意,一旦各方面条件允许,将采取措施,对帕里河的天然坝体进行有控制的泄洪。”

中国地质调查局根据国土资源部地质环境司的要求,部署中国国土资源航空物探遥感中心开展此项工作,航遥中心组织了“西藏帕里河滑坡卫星遥感调查项目组”,投入西藏帕里河滑坡卫星遥感调查工作。

1 调查区位置及自然地理概况

调查区位于我国西藏自治区阿里地区西端的札达县曲松乡境内,西与印度,北与印控克什米尔交界,见图 1。

帕里河发源于印控克什米尔山区,流经我国西藏自治区札达县西北部后,跨越中印边境,下游进入印度喜马拉雅邦(Himachl),与萨特莱杰河相连。境内帕里河流域地区属喜马拉雅山脉西北段,为高山峡谷地形,海拔约在 3 500~6 500 m 之间,大部在海拔 4 500 m 以上,地形高差约 500~3 000 m。高山上有积雪,少植被分布。

调查区属高海拔的阿里气候区,气候恶劣,太阳辐射强烈,气温低,一年分为两季,冬季为风季,大风日数超过 100 d,降水(雪)稀少^[1]。

帕里河流域的区域构造部位属印度板块的喜马拉雅



注:地图源自 1995 年中华人民共和国国家普通地图集 158 页
西藏自治区部分改编

图 1 帕里河滑坡调查区位置示意图

Fig. 1 A map of Pali River and the region affected by the landslide

雅板片(I),新构造活动强烈,地震活动频繁。

2 技术方法

项目工作采用数字滑坡技术,即基于滑坡地学原理,利用遥感与空间定位技术获取滑坡及其发育环境基本信息,利用 GIS 技术存储和管理这些数字信息;并在此基础上,根据滑坡地学原理,以空间分析了解滑坡及堰塞湖。用高分辨率图像查明滑坡及堰塞湖位置、规模并分析其性质,以中等分辨率图像辅助监测它们的活动及变化。

2.1 数据源

至 2006 年底本项调查与监测共采用了高中分辨率共 6 类(ETM 15 m, ASTER 15 m, SPOT5 10 m 和 5 m, QuickBird 0.6 m, Orbview 1 m 和 CBERS2 1 m),滑坡前后共 13 个时相的卫星数据。

本项目的调查比例尺为 1:10 000。主要采用 2 类地理控制:一是数字化的 1:50 000 地形图,二是由 ASTER 立体像对生成的 1:50 000 DEM。由于未能获取 1:10 000 DEM,故就地理控制精度而言只是 1:50 000。采用局部加密 DEM,使地物解译的相对精度接近或达到 1:10 000。

2.2 图像处理

图像处理包括多光谱合成、数据融合、镶嵌、几何校正与图像配准工作,主要在 PCI, ENVI 和 Photoshop 平台上进行。

2.3 图像解译

基于滑坡地学原理,在处理合格的基础图像上(包括数字地形)采用人机交互方法进行解译,获取滑坡及

地质环境基本信息。解译主要在 MAPGIS 和 Photoshop 平台上进行。

2.4 GIS 和空间分析

将获取的基本信息在 GIS 系统中进行空间分析及计算。该项工作主要在 MAPGIS, ENVI 和 Photoshop 平台上进行。

3 解译结果

3.1 2004 年 06 月 22 日滑坡

2004 年 06 月 22 日发生的滑坡位于境内帕里河中峡谷右岸的 4 120 ~ 4 320 m 高程处。该段河岸主要由灰岩组成, 产状倾北西, 基本为顺层坡。滑坡前

(SPOT 20031001)、后(QB 20040911)2 图像(见图 2(d), 2(e))解译表明, 2004 年 06 月 22 日灾害性质为: 快速基岩滑坡, 即部分斜坡被节理裂隙切割, 被切割的块体沿层面快速向河滑动, 滑体已基本落入河中, 几近堵断帕里河(可能曾短暂完全堵断)。求得 2004 年 06 月 22 日滑坡区投影面积约 2 万 m^2 。

2005–2006 年的监测表明, 2004 年 06 月 22 日滑坡后, 该处斜坡基本稳定, 仅残留滑床左上侧(图 2(a)上部箭头所示)有小块滑落; 残留滑床中下部(图 2(a)下部箭头所示)有较长裂隙发育, 但并未贯通。综合分析认为该段斜坡近期再次发生大规模滑坡灾害的可能很小。

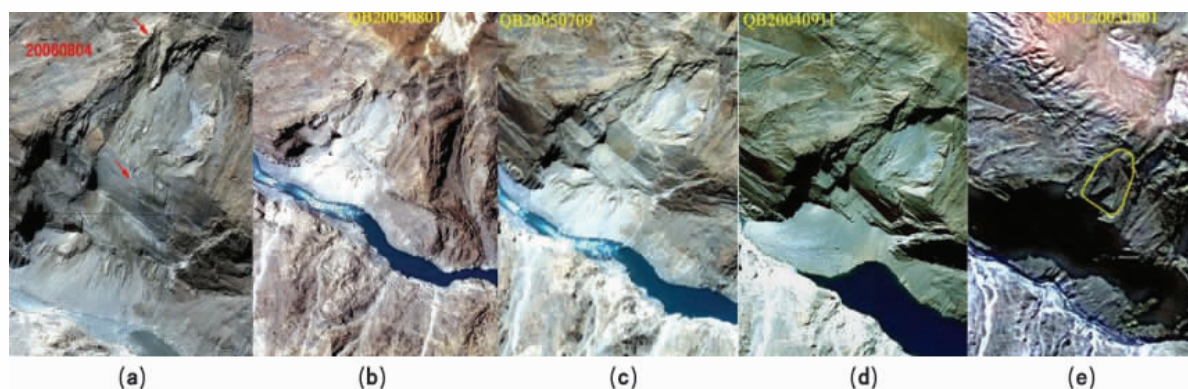


图 2 5 个时相的 2004 年 06 月 22 日滑坡

Fig. 2 A comparison of 5 temporal data for 2004-06-22 landslide

3.2 堰塞湖-帕里湖

遥感解译发现迄今的地面调查报告及媒体报导称为堰塞湖的湖泊实际上为境内帕里河中段的一个湖泊, 由于目前沿境内帕里河并未发现其他湖泊, 故暂称其为帕里湖。湖中心位置坐标: 78°44'48"E, 32°19'44"N。

1) 2004 年 06 月 22 日滑坡灾害前的帕里湖

图 3 所示的 SPOT200310+DEM 图像清楚地反映了近于干涸的帕里湖湖床特征: 湖盆整体呈橄榄形, 东西长约 1.86 km, 南北宽约 1.15 km, 面积约 1.3 km^2 , 湖底为斜面。湖盆周围是由二叠系变质岩组成的较坚硬的湖岸山体。该图像还表明帕里湖湖岸呈台阶状, 在海拔 3 870 m, 3 900 m 和 3 970 m 有清楚的 3 级平台。在帕里湖南面有一面积更大的、群山围绕的三角形平台, 由其细腻平滑的表面推测这是一山间湖泊的湖床, 其上则有平均高程为 4 000 m, 4 020 m 和 4 060 m 的 3 级台阶。其西端有一村民点, 称为比姆, 故暂称该平台为比姆湖平台。

进一步分析发现在湖面约为 4 000 m 高程时, 比姆湖与帕里湖是相通的。目前则表现为典型的高原山地

萎缩湖泊, 共计 6 级台阶, 推测为湖泊漫滩及 I~V 阶地。根据中国区域地质概论等资料^[2-3], 本区属印度板块的喜马拉雅(逆冲)板片, 是新生代地壳抬升十分强烈的地带, 如以平均每年抬升 20 mm 计, 则可估算帕里湖各级阶地的年代如表 1。表 1、图 4 分析表明在约 9 500 年

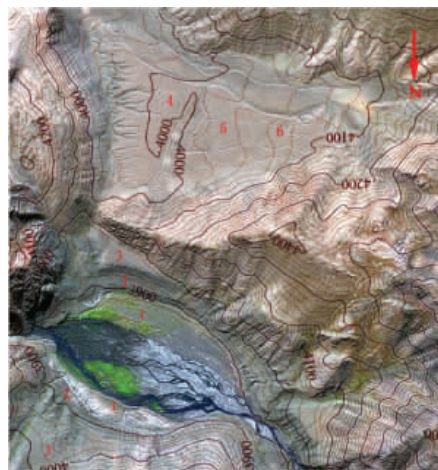


图 3 2004 年 06 月 22 日滑坡前的帕里湖湖盆

Fig. 3 Pali lake basin before 2004-06-22 landslide

前,相连的比姆湖与帕里湖为一湖面达 9.1 km^2 的大湖,后主要由于降水降雪减少,大量冰川后退甚至消失,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,造成帕里湖逐渐萎缩,如图 4 所示。

表 1 帕里湖阶地特征

Table 1 Terraces characters of Pali lake

阶地级别	平均高程/m	面积/ km^2	距今/a
漫滩	3 870	1.29	现代
I	3 900	2.13	约 1 500
II	3 970	4.48	约 5 000
III	4 000	6.22	约 6 500
IV	4 020	7.28	约 7 500
V	4 060	9.10	约 9 500

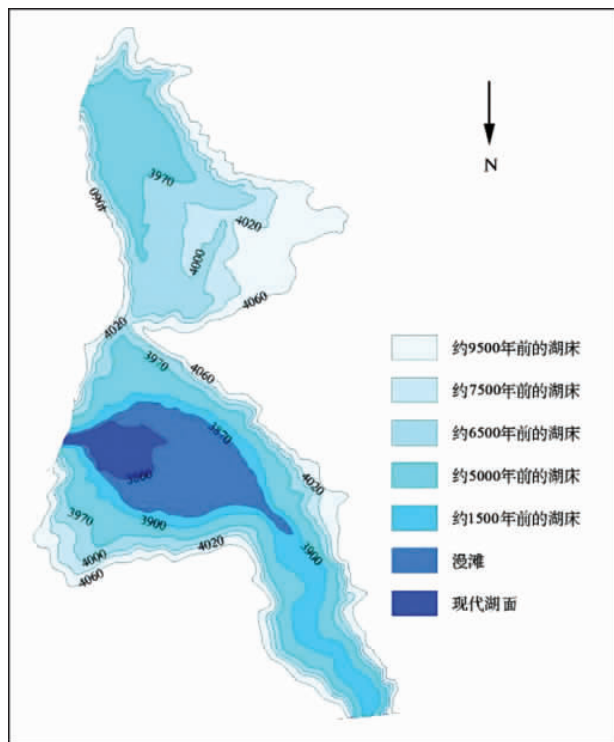


图 4 帕里湖的变迁

Fig. 4 Changes of Pali lake

以上分析确定帕里湖的性质为:帕里河流经的,逐渐萎缩的湖盆,有较大的蓄水空间和快速泄洪能力(湖底倾斜)。

2) 2004 年 06 月 22 日滑坡灾害后的帕里湖变化

2004 年 06 月 22 日滑坡堵塞帕里河,原帕里湖位置成为一堰塞湖,采用 2004 年 09 月 11 日、2005 年 07 月 09 日、2005 年 08 月 01 日和 2006 年 05 月 24 日、2006 年 08 月 04 日共 5 个时相的 QuickBird 卫星图像监测堰塞湖变化,如图 5 所示。QB 20040911 图像(图 5(a))表明,在崩塌堆积坝堵河(2004 年 06 月 22 日)80 d 后,湖水仍充满湖盆,此时湖水海拔约 3 900 m,以湖床平均

高程 3 870 m 计,现采用以下公式求堰塞湖水量。

$$V = \frac{1}{3} H (R_1 + R_2 + \sqrt{R_1 R_2})$$

其中, H 为堰塞湖的湖水高度,由滑坡前后图像和 DEM 求得其为 30 m; R_1, R_2 分别为湖顶、湖底面积。由 QB 2004 年 09 月 11 日求得湖表面积为 $1\,748\,733 \text{ m}^2$,由 ASTER 2003 年 10 月 01 日和 SPOT20031001 求得湖底面积为 $837\,306 \text{ m}^2$ 。

计算 2004-09-11 的蓄水量 $V = 37\,960\,905 \text{ m}^3 \approx 3\,800 \text{ 万 m}^3$ 。

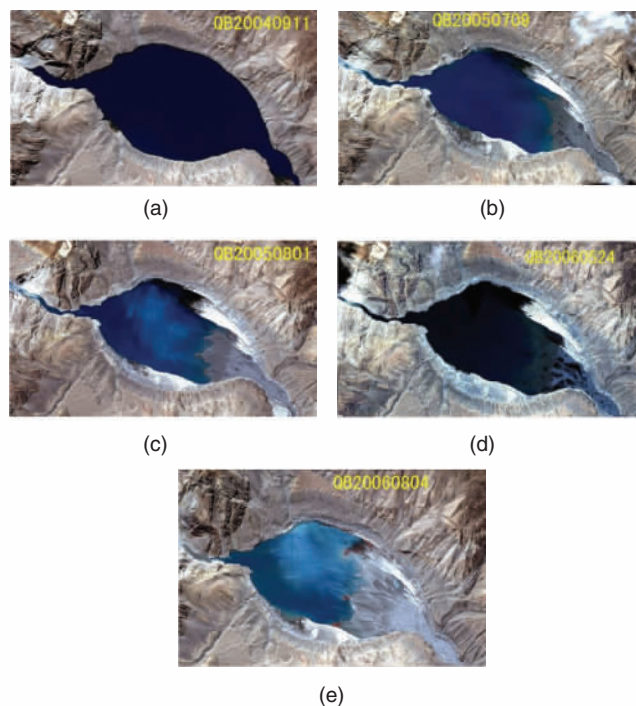


图 5 2004 年 06 月 22 日滑坡后帕里湖变化

Fig. 5 Pali lake before and after
2004-06-22 landslide

同样求得 2005 年 07 月 09 日堰塞湖的蓄水量为 927 万 m^3 ; 2005 年 08 月 01 日的蓄水量为 446 万 m^3 ; 2006 年 08 月 04 日的蓄水量为 377 万 m^3 。其中 QB20040911 和 20050709 之间水量变化最大,期间可能发生溃坝,随后帕里湖水逐渐减少。

3) 帕里湖涨水及溃决过程分析

根据目前已收集(购买)到的滑坡前后各类共计 13 个时相的堰塞湖卫星图像解译的湖面高程曲线分析,如图 6 所示,2004 年 6 月 22 日滑坡前湖水面在 3 860~3 870 m 高程之间。6 月 22 日湖口下游发生滑坡并堵河后,湖面开始上升,至 8 月中旬,上涨到最高在 3 900~3 907 m(实测)高程。根据 2005 年 02 月 20 日图像推测 2004 年秋、冬和 2005 年春,湖水面是保持在 3 900 m 高程以上的。2005 年 06 月 26 日上午 10 时溃坝,水位急速降至 3 883.5 m (实测),随后水位继续下降,至

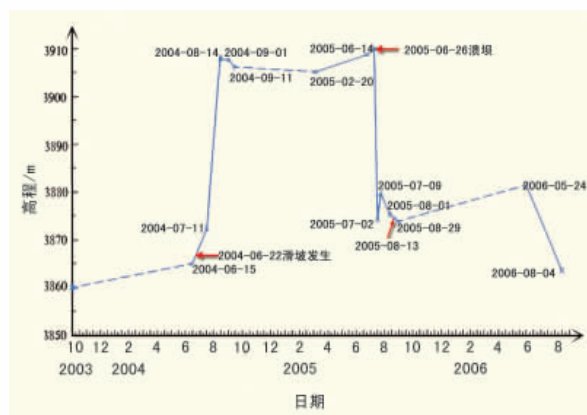


图 6 2004-06-22 滑坡前后帕里湖变化曲线

Fig. 6 Variation curve before and after
2004-06-22 landslide

2006 年 8 月前湖面虽有起伏,但总体趋于减少。预测除非发生新的堵河事件,帕里湖的水暂不会对下游造成灾害。

卫星监测表明 2004 年 6 月中旬至 8 月中旬堰塞湖水位上涨了约 30 m,此间未发现有溃坝现象,溃坝只发生在 2005 年 6 月 26 日。由 2004 年 9 月 11 日和 2005 年 07 月 09 日图像结合 DEM,计算出该期间湖水共计下泄了 2 873 万 m^3 ,可见其强大的泄洪能力。

由于帕里湖盆有较大的蓄水空间和快速泄洪能力,下游为峡谷,故堰塞湖溃决造成的灾害将难以控制。距帕里湖口约 5 km 和 34 km 的我国境内西藏自治区札达县曲松乡的卡拉村及楚鲁松杰村将是最可能受灾的村民点。国境线以南的印度村庄距湖口沿河约 60 km,由于所处地形较平缓,也可能被灾害波及。下游村民防灾应以避让为主。

4 结语

1) 2004 年 06 月 22 日发生在帕里河中段的灾害性质为快速基岩滑坡。2005-2006 年的监测表明 2004 年 06 月 22 日滑坡后,该处斜坡基本稳定,仅残留滑床左上侧有小块滑落。综合分析认为该段斜坡近期再次发生大规模滑坡灾害的可能很小。

2) 卫星遥感调查表明堰塞湖在滑坡前是帕里河流经的一个萎缩的湖盆,2004 年 06 月 22 日滑坡堵塞帕里河形成一堰塞湖,至 2004 年 8 月中旬至 9 月,水面上涨到最高约在 3 900~3 910 m 高程,此水位大约一直保持至 2005 年 6 月,2005 年 6 月 26 日滑坡坝溃决,至 2005 年 7 月 9 日共下泄水量 2 873 万 m^3 ,自此以后直至 2006 年 8 月湖水虽有起伏但总体呈平稳下降,近期除非发生大规模滑坡,不易成灾。

3) 帕里河堰塞湖溃决造成的灾害难以控制,主要在我国境内受灾,也可能将波及下游印度村庄,下游村民防灾应以避让为主。

参考文献 (References)

- [1] 郑 度, 等. 中国的青藏高原[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
ZHENG Du, et al. Chinese Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: China Science Press, 1985.
- [2] 程裕淇. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社, 1994.
CHENG Yuqi. An introduction of China regional geological [M]. Beijing: China Geology Press, 1994.
- [3] 王 琪, 张培震, 牛之俊, 等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(7): 529-536.
WANG Qi, ZHANG Peizhen, NIU Zhijun, et al. The current earth crust movement and tectonic deformation of China continent[J]. Science in China, Ser D, 2001, 31(7): 529-536.

(责任编辑 赵 佳)

更

正

本刊 2007 年第 4 期发表的余锐萍等人的文章“病毒性肝炎——值得警惕的重要人兽互传病”一文,第 49 页图 7、图 8 中箭头所指处有误,谨向广大读者致以歉意。现予以更正。

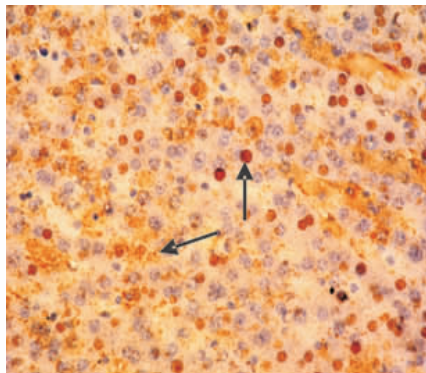


图 7 屠宰猪肝 HEV 免疫组化染色,散在肝细胞细胞浆和细胞核呈阳性反应(↑).40×

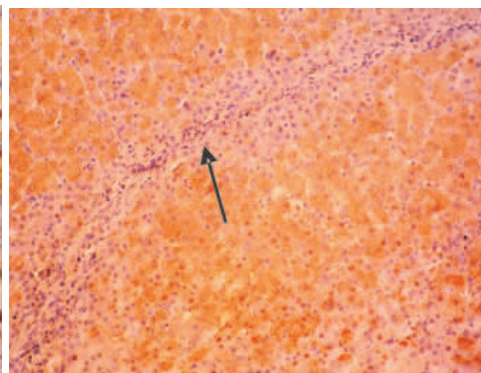


图 8 屠宰猪肝 HCV 免疫组化染色,成片的肝细胞细胞呈阳性反应间质炎症细胞浸润(↑).20×