

# IKONOS 影像在黑方台黄土滑坡调查中的应用

许 领<sup>1</sup>, 戴福初<sup>1</sup>, 邝国麟<sup>2</sup>, 闵 弘<sup>3</sup>, 许 冲<sup>1</sup>

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 香港大学 土木工程系 香港;

3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071

**摘 要:** 以黑方台为典型的黄土台塬, 过量农业灌溉造成了区内地下水位上升, 诱发了大量黄土滑坡, 该文选用 IKONOS 影像对其进行了遥感解译。通过对比 PCA 变换、Brovey 变换、IHS 变换和 Multiplative 变换融合影像效果, 选用 PCA 变换融合影像作为分析的基础。重点分析了 IKONOS 影像在黑方台黄土滑坡调查中的应用。在综合分析研究区地质资料和滑坡影像特征的基础上, IKONOS 影像在滑坡类型划分、滑坡边界及期次关系确定、空间分布规律和滑坡特征参数统计方面具有很好的应用前景。

**关键词:** IKONOS 影像; 黄土滑坡; 农业灌溉; 黑方台

中图分类号: X43

文献标识码: A

## 1 引 言

黑方台位于甘肃省永靖县境内, 属黄河 4 级基座阶地, 其东侧前缘直接与黄河 2 级阶地相接, 总面积约 13km<sup>2</sup>。20 世纪 60 年代末期, 为了安置刘家峡、盐锅峡水库区的移民, 在黑方台建成了提水灌溉工程, 灌溉面积为 753hm<sup>2</sup>, 年提水总量为 600 × 10<sup>4</sup>—800 × 10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>(王志荣等, 2004), 造成研究区地下水位上升, 诱发了大量黄土滑坡(王家鼎, 1992, 1999; 赵尚学等, 1995; 吴玮江 & 王念秦, 2002)。1968 年以来, 黑方台滑坡造成上亿元经济损失和惨重的人员伤亡。

滑坡遥感解译要求影像具有较高的空间分辨率, 以便充分反映滑坡地貌特征及其与周围环境的差异。IKONOS 卫星于 1999-09-24 发射成功, 是世界上第一颗高分辨率商业遥感卫星, 可采集 1m 分辨率全色和 4m 分辨率多光谱影像, 具有多条带、大面积、同轨立体、快速采集优势。IKONOS 可提供卫星 RPC 参数, 可提高影像几何纠正效率和正射纠正精度。针对研究区面积小、调查精度要求高等特点, 选用 IKONOS 影像对研究区黄土滑坡进行调查。

## 2 影像融合

以研究区 1:1 万的数字化地形图作为地理坐标基准, 利用数字化 DEM 和影像 PRC 参数, 对 IKONOS 影像进行几何纠正和正射处理。

分别采用 PCA 变换、Brovey 变换、IHS 变换和 Multiplative 变换对 IKONOS 多光谱与其全色波段进行融合。图 1(a)、(b)、(c)、(d)分别为上述 4 种融合方法融合影像。由图 1 可见, PCA 变换融合影像光谱保真度最高, 色彩层次清楚, 纹理结构突出, 融合效果最好, Brovey 变换次之, 而 IHS 变换和 Multiplative 变换融合影像光谱、纹理信息损失较多。因此, 选用 PCA 变换对 IKONOS 影像(多光谱及其全色)进行融合, 将其融合影像用于本文黄土滑坡遥感解译。

## 3 黄土滑坡类型解译

本节探讨了 IKONOS 影像在黄土滑坡类型划分方面的应用潜力, 并结合区域地质资料对滑坡成因机制进行初步讨论。通过地面调查对解译结果进行了检验和评价。

收稿日期: 2008-03-25; 修订日期: 2009-09-19

第一作者简介: 许领(1982—), 男, 中国科学院地质与地球物理研究所, 研究方向: 黄土滑坡发生机理与防治。E-mail: suyu820@163.com。

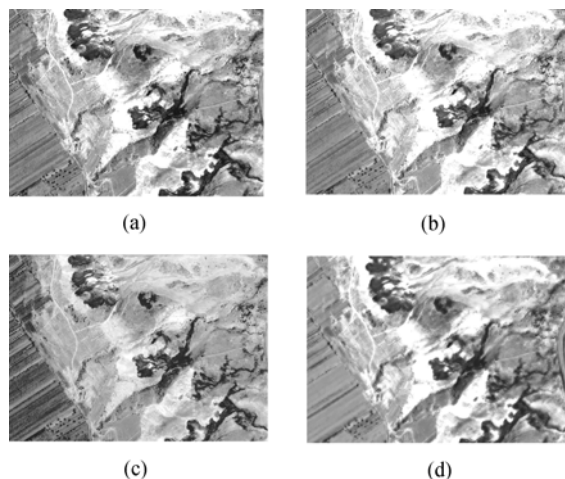


图1 不同融合方法融合效果对比

(a) PCA 变换融合; (b) Brovey 变换融合; (c) IHS 变换融合;  
(d) Multiplative 融合

### 3.1 黄土滑坡类型解释

黑方台黄土滑坡在 IKONOS 影像(1m 分辨率)上总体呈 3 类特征, 因此, 从滑坡地貌特征来看, 研究区发生了 3 类较为典型的黄土滑坡。综合考虑滑坡形态特点和研究区地层结构以及滑坡诱发因素(长期农业灌溉), 3 种类型滑坡分别为黄土泥流、黄土-基岩滑坡(吴玮江 & 王念秦, 2002)、黄土滑塌, 其遥感解译方法如表 1。

表 1 滑坡遥感解译方法

滑坡类型	解译方法
黄土泥流	滑坡后壁可见地下水出露, 影像上呈黑色; 滑距远, 滑动物质流态化特征明显; 具有半圆或者弧形后缘, 后壁中部较周围发亮等
黄土-基岩滑坡	具有大规模的塬边堆积地貌, 滑距短, 堆积体与后缘之间具有明显的错动、滑移等地貌迹象
黄土滑塌	堆积体位于塬边坡脚处; 干燥条件形成, 崩滑物质颜色均一, 表现为正常黄土影像特征

图 2(a)为典型的黄土泥流影像特征, 该类型黄土滑坡呈流态化, 具有远程滑坡的特征。该类型滑

坡为黄土层内滑坡, 第三系泥岩未受扰动。理论上可以对此给出解释: 泥岩作为隔水层, 长期灌溉造成上覆黄土底部饱水、软化, 从而发生静态液化(金艳丽 & 戴福初, 2007)形成泥流。如图 2(b)所示, 该类型滑坡滑后后壁有泉水出露, 滑后影像上亦可见多股黑色条带(图 2(a)), 即为水在影像上的反映。

图 3(a)、(b)为黑方台水管所黄土-基岩滑坡影像特征和现场场景, 该滑坡滑距约 50m, 整个滑体未脱离初始滑动面, 滑体后部与塬面近乎垂直错动, 滑体整体性较好。该滑坡舌部可见红色物质, 考虑到黑方台底部基岩为白垩系( $K_{hk}$ )泥岩(影像上呈暗红色), 因此, 可以确定该类型滑体由黄土和基岩 2 部分组成。长期农业灌溉条件下, 灌溉水顺塬地裂缝进入泥岩, 泥岩强烈软化, 从而导致滑坡的发生。该类滑坡机制受泥岩力学性质的控制, 滑坡酝酿、发展时间长, 具有规模大、滑程短、复活性强等特点。

图 4 为一黄土滑塌, 滑体颜色均一, 在坡脚形成堆积。滑塌同泥流一样发生于黄土层内, 但其剪出口位于非饱和黄土层内, 为灌溉条件下, 地表水入渗降低非饱和黄土基质吸力所致。

### 3.2 解译精度评价

通过黑方台滑坡现场调查, 对解译精度进行了评价(表 2)。评价指标包括解译准确率和解译精度, 其定义如表 2。解译准确率反映的是解译结果的可信程度, 解译精度反映的是实际滑坡发育情况可解译程度, 是滑坡遥感调查最有效的评价指标。由于卫星数据采集时间是 2004 年, 调查过程中对近 3 年发生的滑坡结合滑坡地貌特征加以区别和排除。由于研究区黄土滑坡演化特征明显, 个别老滑坡后期改造严重, 分析时未作考虑。

研究区黄土泥流和黄土-基岩滑坡影像特征典型, 两类滑坡遥感解译准确率高达 100%(表 2)。但

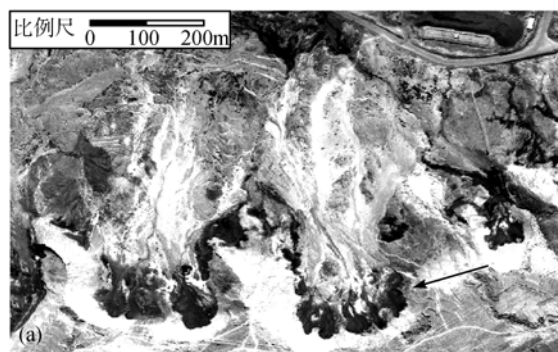


图2 泥流型黄土滑坡

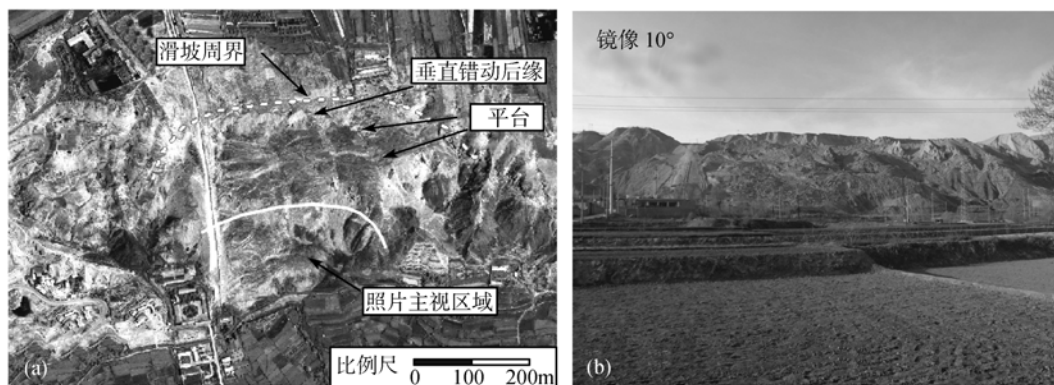


图3 黑方台水管所黄土-基岩滑坡



图4 黄土滑塌

图6 老滑坡及其后期滑坡期次关系

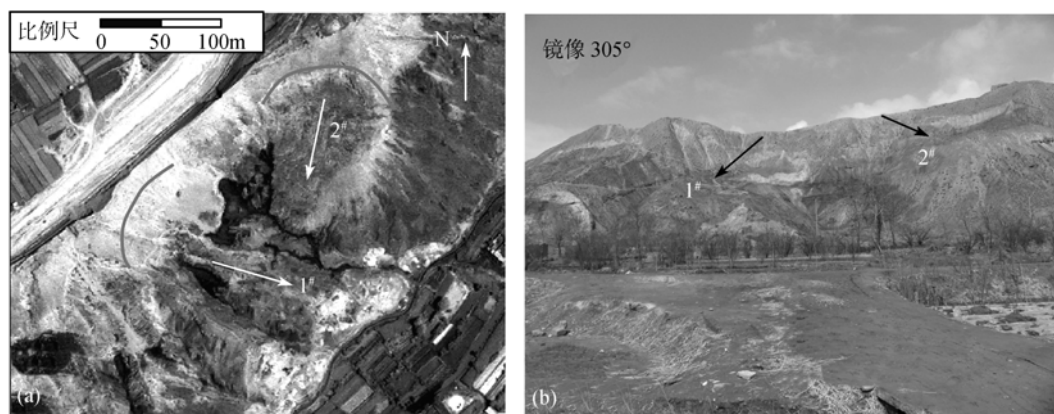
图5 黄土-基岩接触面滑坡和黄土-基岩切层滑坡  
1#.黄土基岩切层滑坡; 2#. 黄土接触面滑坡

表2 黑方台黄土滑坡解译精度

滑坡类型	解译结果 $a$	检验结果 $b$	实际调查 $r$	解译准确率 $b/a$	解译精度 $b/r$
黄土泥流	25	25	25	100%	100%
黄土-基岩滑坡	16	16	18	100%	89%
黄土滑塌	14	12	20	86%	60%

注：上述实际调查结果排除了卫星数据获取时间以后的新滑坡；研究区滑塌只对于具有一定规模、地貌特征典型的进行了统计

从解译精度来看, 只有黄土泥流解译精度达 100%, 黄土基岩滑坡解译精度为 89%, 这主要由于早期滑坡受塬边侵蚀或者被后期滑坡所改造, 造成滑坡特征不明显所致。

黄土滑塌解译效果较差。解译准确率和解译精度分别为 86% 和 60%(表 2)。黄土滑塌主要分布于黑方台磨石沟坡麓、陡立沟谷地带。由于滑塌体积较小, 其地貌形态与周围环境差异较小, 以致解译精度较低。

### 3.3 滑坡类型的补充及解译方法

黄土-基岩滑坡可进一步分为黄土-基岩顺层滑坡和黄土基岩-切层滑坡(吴玮江 & 王念秦, 2002)。以前研究多认为黑方台主要发育 2 类黄土滑坡, 黄土层内滑坡(滑塌、泥流)和黄土-基岩顺层滑坡。图 3(a)、(b)所示滑坡实际为黄土-基岩顺层滑坡, 该滑坡滑动方向  $180^\circ$  与该处基岩倾向(产状  $180^\circ \quad 12^\circ$ )一致。IKONOS 影像解译及地面调查发现, 除上述滑坡类型外, 黑方台还发育 3 处黄土-基岩切层滑坡和 1 处黄土-基岩接触面滑坡。

图 5(a)、(b)1<sup>#</sup>滑坡为黄土-基岩切层滑坡, 该滑坡的主滑方向为  $110^\circ$ (影像特征即可判断)与基岩倾向(基岩产状  $185^\circ \quad 16^\circ$ )呈  $70^\circ$  相交, 因此, 滑面必与基岩层面相交, 即形成“切层”滑面, 从而发展为黄土-基岩切层滑坡。图 5(a)、(b)2<sup>#</sup>滑坡为黄土-基岩接触面滑坡, 该滑坡的主滑方向为  $185^\circ$ , 与基岩倾向一致, 并且以  $65^\circ$  交于此处塬边坡向( $120^\circ$ )。黄土-基岩接触面滑坡受下伏基岩面的控制, 滑动面为黄土与基岩的接触面, 滑动物质为黄土。图 5(a)2<sup>#</sup>滑坡影像上亦可见该处基岩保持完整, 未发生滑动。

因此, 黄土-基岩接触面滑坡、切层滑坡以及顺层滑坡的解译, 首先需通过影像判断滑坡主滑方向以及该滑坡处基岩是否受到扰动; 其次, 通过分析研究区地质资料获取基岩分布情况和岩层产状信息(黄土下伏基岩具有区域上的规律性, 主要为第三系以来的沉积相砂岩、泥岩, 性质较为单一)。若滑动方向与基岩倾向一致, 且基岩未受扰动, 则为黄土-基岩接触面滑坡; 若下伏基岩发生扰动, 当滑动方向与基岩倾向一致时为黄土-基岩顺层滑坡, 反之则为黄土-基岩切层滑坡。

## 4 其他应用评价

### 4.1 滑坡周界及期次关系的确定

黑方台黄土-基岩滑坡滑距短、规模大, 个别滑

体厚度达 50—80m, 宽 100—200m, 特别对于一些巨型滑坡, 体积达数百万立方米。该类型黄土滑坡地面调查存在滑坡周界以及新老滑坡关系不好确定等问题。IKONOS 影像具有较高的空间分辨率以及遥感特有的宏观可视性可以很好的解决上述问题。

图 3 为黑方台水管所黄土-基岩滑坡, 此滑坡 2004 年 5 月发生, 估计方量为 600 万  $\text{m}^3$ 。地面调查无论从哪个角度只能见到滑坡一角: 站在前部阶地, 滑坡舌部堆积体与阶地高差达  $10\text{m}^3$  之多, 只可见坡体前缘一角; 站在塬上, 只可见滑坡垂直错动平台、不规则后缘局部, 对于滑坡的整体把握以及滑坡周界确定很困难。因此, 借助 IKONOS 可以很好地对其滑坡周界进行确定, 如图 3。

图 6 为由 3 个独立黄土-基岩滑坡组成的滑坡群, 其期次关系的确定亦需借助 IKONOS 影像。分析表明: 该处 3 个滑坡构成了一早期老滑坡, 滑坡体 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>实际为该老滑坡后期不同部位的复发。1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>滑体之间的位置关系表明(1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>滑坡体周界改造了 2<sup>#</sup>滑坡体), 2<sup>#</sup>滑坡发生时间要早于 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>号滑坡。

### 4.2 黄土滑坡空间分布规律

黄土滑坡形成机制受滑前地形地貌和地质条件的控制, 因此, 黄土滑坡在空间分布上具有一定的规律性。利用数字化 DEM 数据, 叠加 IKONOS 遥感影像进行 3 维地形分析(图 7), 可对研究区黄土空间分布规律进行宏观分析。

如图 7, 黄土泥流主要沿野狐沟以北凹岸发育。该处塬面海拔在 1710m 左右。地形分析表明, 泥流发生区为黑方台泥岩上层滞水汇流出口, 径流强烈, 可见大面积的泉水出露, 而其余斜坡地段则没有此特征。图 7 泥流集中发生区亦可见, 泥流滑坡发育具有典型的群体性(勒泽先 & 韩庆宪, 1989)发育特征。如图 7, 黄土-基岩滑坡主要在野狐沟以南, 面向黄河一侧塬边发育, 海拔在 1735m 以上, 总体坡向为  $150^\circ$ — $200^\circ$ 。通过 IKONOS 影像解译, 对研究区黄土-基岩滑坡主滑方向进行了统计(图 8), 基本与此类滑坡所处塬边坡向一致, 个别偏离是因为统计了 3 个基岩切层滑坡。基础地质资料分析和实地测量表明, 研究区泥岩倾向在  $160^\circ$ — $190^\circ$ 。考虑到塬边坡向(临空场地条件)对滑坡滑动方向的影响和制约, 黄土滑坡在坡向  $150^\circ$ — $200^\circ$  地段发生是黄土-基岩滑坡主滑方向与基岩层面倾向一致的表现。

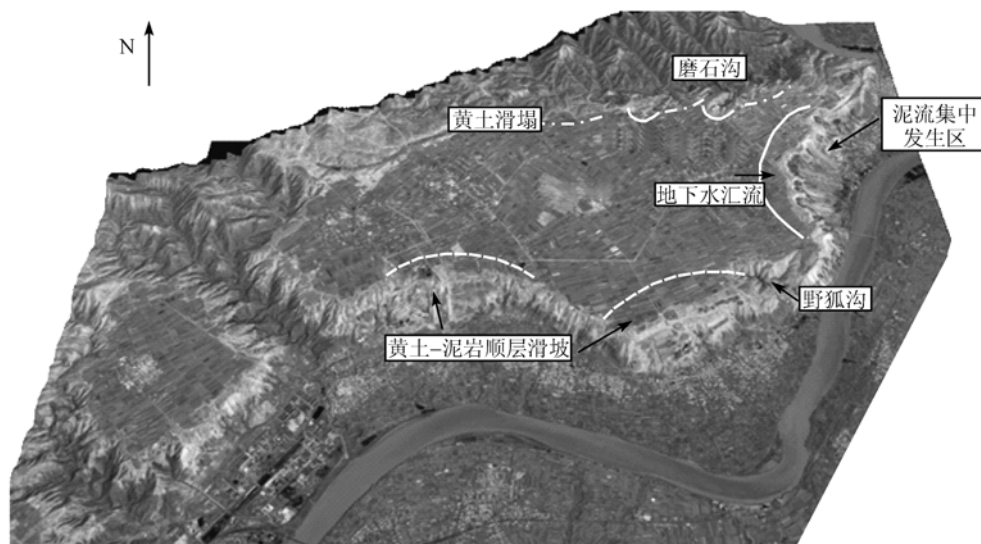


图7 IKONOS 影像与 DEM 叠加构建研究区场景

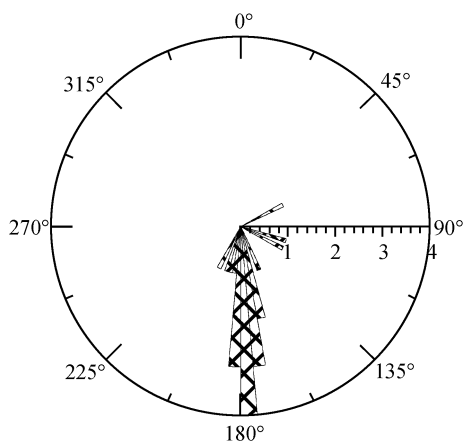


图8 黄土-基岩滑坡主滑方向玫瑰花图

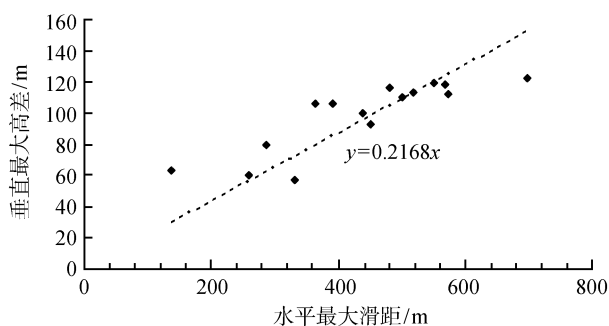


图9 泥流滑坡滑动特征统计

#### 4.3 结合 DEM 的滑坡特征统计

IKONOS 融合影像具有 1m 空间分辨率, 通过遥感图像可直接对其滑距、堆积体宽度等进行测量、统计, 这是地面调查所不可相比的, IKONOS 影像与 DEM 经过配准、叠加可获得影像地物点的相应高程信息, 从而获得滑坡滑距坡度等滑坡特征参数。通过 IKONOS 影像与 DEM 叠加, 对黑方台泥流型滑坡的最大滑距以及垂直高差进行了统计, 其结果如图 9。最大高差和最大滑距分别为滑坡后缘顶部与滑坡舌前缘垂直、水平距离, 其比例关系与滑坡体物质力学性质具有统计关系(Corominas, 1996)。图 9 可见, 黑方台泥流垂直最大高差  $y$  与水平最大滑距  $x$  具有线性特征, 即  $y=0.2168x$ , 以此为依据, 在已知塬边相对坡高的情况下, 可以对可能发生泥流滑坡滑动距离进行预测。

## 5 讨 论

### 5.1 黄土物质成分及地貌特征对遥感应应用效果的影响

多光谱遥感反映的是地物反射太阳光谱信息的差异, 因此, IKONOS 影像不可避免受地物采光条件和地类之间光谱特征差异的影响。考虑到黄土物质组成(含量 75% 以上为粉细砂颗粒, 具有较高的反射率)以及黄土台塬沟谷冲蚀地貌发育等因素, 遥感影像在黄土滑坡精细调查方面也存在一些不足, 如小方量的黄土滑塌解译效果较差等。因此, 针对性地开展基于黄土物质成分反射特征的光影处理技术是今后黄土地区遥感应应用研究的一个方向。

### 5.2 专业知识和地质环境因素

IKONOS 影像不能深入反映坡体结构特征, 而滑面物质组成、发育位置及其局部扰动情况是判定滑坡性质的重要依据, 因此, 需要解译人员具有一定专业背景和野外工作经验。黄土滑坡遥感解译首先要收集研究区地质资料以及已有相关研究成果,

通过综合分析区内地质环境因素(地层结构, 岩性特征, 水文地质条件, 降雨分布, 植被特征和农业灌溉等)初步确定区内可能的诱发滑坡因素, 结合 IKONOS 影像反映的地貌信息, 较为全面地分析滑坡发育规律和成因机制等。前文滑坡类型划分以及空间分布规律的遥感解译是在充分考虑区内地质环境条件下, 将地貌影像特征与地质背景相结合取得的结论。

## 6 结 论

(1) 通过 PCA 变换、Brovey 变换、IHS 变换和 Multiplative 变换对 IKONOS 多光谱与其全色进行了融合, 结果表明 PCA 变换融合影像色彩层次清楚、纹理突出, 滑坡特征明显, 尤其对塬边地下水的出露有较好的反映;通过实地调查, IKONOS 影像黄土滑坡解译精度较高, 满足调查要求。

(2) 在充分分析研究区基础地质资料和黄土滑坡影像特征的基础上, IKONOS 影像在大型滑坡周界及滑坡期次关系的确定、滑坡类型划分、空间分布规律及滑坡特征参数统计等方面具有很好的应用前景。

## REFERENCES

- Corominas J. 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, **33**: 260—271
- Jin Y L and Dai F C. 2007. The mechanism of irrigation-induced landslides of loess. *Chinese Journal of Geotechnical*, **29**(10): 1493—1499
- Le Z X and Han Q X. 1989. Group-distribution features of loess plateau. 1987. National Landslide Technicality Symposium Paper S'Volume. Chengdu, Sichuan Publishing House of Sciences & Technology
- Wang J D and Liu Y. 1999. A further study on the mechanism of high-speed loess landslide in state of creeping and sliding liquefaction. *Journal of Northwest University*, **29**(1): 79—82
- Wang J D. 1992. A mechanism of high-speed loess landslides: liquefaction of saturated loess due to creep. *Geological Review*, **38**(6): 532—539
- Wang Z R, Wu W J and Zhou Z Q. 2004. Landslide induced by over-irrigation in loess platform areas in Gansu Province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, **15**(3): 43—47
- Wu W J and Wang N Q. 2002. Basic types and active features of loess landslide. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, **13**(2): 36—40
- Xu J L. 1997. Recent study on the presumption of sluice valve and movement character of rapid landslides. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, **8**(4): 23—27
- Zhao S X, Li H L and Ma D T. 1995. Study on the landslides at the edge of loess terrance in Yanguoxia reservoir region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, **15**(1): 19—23
- 附中文参考文献
- 金艳丽, 戴福初. 2007. 灌溉诱发黄土滑坡机理研究, 岩土工程学报, **29**(10): 1493—1499
- 勒泽先, 韩庆宪. 1989. 黄土高原滑坡分布的“群体性”. 1987 年全国滑坡学术讨论会滑坡论文选集. 成都: 四川科学技术出版社
- 王家鼎, 刘悦. 1999. 高速黄土滑坡、蠕、滑动液化机理的进一步研究. 西北大学学报(自然科学版), **29**(1): 79—82
- 王家鼎. 1992. 高速黄土滑坡的一种机理——饱和黄土蠕动液化. 地质论评, **38**(6): 532—539
- 王志荣, 吴玮江, 周自强. 2004. 甘肃黄土台塬区农业过量灌溉引起的滑坡灾害, 中国地质灾害与防治学报, **15**(3): 43—47
- 吴玮江, 王念秦. 2002. 黄土滑坡的基本类型与活动特征. 中国地质灾害与防治学, **13**(2): 36—40
- 徐峻岭. 1997. 再论高速滑坡的闸门效应及其运动特征. 中国地质灾害防治学报, **8**(4): 23—27
- 赵尚学, 李鸿璉, 马东涛. 1995. 盐锅峡库区黄土台缘滑坡研究. 水土保持通报, **15**(1): 19—23