

地统计分析在滑坡遥感监测中的研究进展

张淑辉

(河海大学土木工程学院, 南京 210098)

摘要: 滑坡监测的常规技术方法有多种,如大地精密测量法、近景摄影测量法等,但这些技术往往会受到气候与地形的限制,实施困难较大。而遥感技术可以克服观测条件的限制,并可针对滑坡不同阶段实行监测。此外,地统计分析方法可充分利用遥感数据本身具有的空间相关性,可以提高影像信息提取的准确性。因此,结合遥感与地统计方法进行滑坡监测具有广阔的应用前景。

关键字: 滑坡监测;遥感;地统计分析

中图分类号: X43

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2007)04-0302-05

我国疆域辽阔,地质构造复杂多变,地形起伏较大,山区面积约占国土面积的三分之二。滑坡灾害的发生频率高,强度大。同时,大型工程项目的实施等人为因素又加剧了滑坡发生的频率及危害。长期以来,我国对滑坡监测的研究投入了很大的人力和物力,常用的监测方法有大地精密测量法^[1]、GPS法^[2]以及近景摄影测量法^[3]。然而,由于天气和地形等原因,再加上人类工程活动等不确定性因素的影响,使得一些地区的常规滑坡监测变得十分困难。因此,如何采用新技术、新方法进行有效的滑坡监测是目前我国滑坡研究中亟待解决的问题。本文在综述滑坡遥感监测研究的基础上,分析了如何利用地统计方法提高遥感监测的准确性,并提出将遥感与地统计方法集成进行滑坡监测应用的可行性。

1 常规滑坡监测技术研究

滑坡监测一般采用大地精密测量法。该方法利用精密水准仪通过几何水准测量测得垂直位移量,并利用精密全站仪通过交会法、导线法等得到水平位移量,由此得知滑坡体的三维位移量、位移趋势以及地表形变范围。因为该方法具备操作简便、易于实施和成果准确可靠等优点,所以长期以来备受滑坡工程监测人员的青睐。但它也存在着一定的局限,例如,易受地形通视条件限制及天气状况影响,监测周期长,连续观测的能力差等^[4]。

与大地精密测量法相比较,采用GPS技术进行滑坡监测,操作更加简单,监测人员无须专业训练即可

使用接收机。并且观测点之间不要求通视,也不受天气的影响,能实现全天候作业。通过精确解算,GPS监测水平位移和垂直位移的精度可以达到mm级^[5]。在基线较短的情况下,GPS技术对垂直位移的形变监测甚至可以达到几何水准测量的精度^[6]。因此,GPS可以直接获取三维坐标。利用该项技术在滑坡研究区合理布设基准点和监测点,通过观测监测点的大地高程变化,得到滑坡区地表形变情况。目前,GPS测量法已经大量应用于形变监测。当然,如果在某些峡谷地区接收到的卫星不够多,测量精度就会降低^[7]。此外,由于GPS接收机的价格较贵,很难推广使用。

另一种常规滑坡监测方法是近景摄影测量法,该方法的测量方式比较多。譬如,利用普通相机或数码相机照相,输入计算机先进行像点量测,再通过程序计算获取三维坐标,根据坐标判断形变^[8];或者用专用量测相机对滑坡监测范围进行拍摄,并构成立体像对,结合坐标量测仪量测出观测点的像坐标,然后通过坐标法测定地面变形^[9]。近景摄影测量用于滑坡监测的优势在于,观测人员无需到达观测现场,且观测站点也不要求绝对稳定,只要取景理想即可^[10]。但是,该方法仍然会受到天气状况的影响,并且位移监测的绝对精度较低。

2 遥感在滑坡监测中的应用

在地形起伏较大,形变观测条件较差的地区,经常利用遥感技术进行滑坡监测。事实上,遥感技术不仅能获取大范围土地覆盖数据,而且更新及

收稿日期: 2007-9-20

责任编辑: 林晓辉

基金项目: 国家自然科学基金项目, 基于InSAR/GPS集成的岩石边坡变形稳定探测研究 (50579013)

作者简介: 张淑辉(1981-),女(汉族),硕士研究生,主要从事地质统计学与遥感应用研究。

时、能连续观测。在滑坡研究方面,遥感主要是用于滑坡区域调查以及滑坡动态监测^[11]。滑坡研究可分为三个阶段^[12]:①探测与识别;②监测;③空间分析和灾害预测。下面,根据滑坡研究的三个阶段,对遥感的应用作简要阐述。

2.1 滑坡的探测与识别

在探测和识别阶段,通常都采用航片进行像片判读,识别出滑坡的鉴别特征(diagnostic features),如泥石流引发的沉积物堆积、地貌地形、冰川退缩及冰舌的位移、岩层断裂等。采用立体视觉影像对边坡不稳定要素及滑坡的其他单个要素进行制图,比例尺最小为1/25 000。而高空间分辨率影像(IKONOS, QuickBird, SPOT-5等)可用于生成滑坡库存地图(landslide inventory maps),比例尺可以达到1/5 000 ~ 1/15 000。

同时,还可利用IRS同步卫星及航片,提取地貌、土地利用及地质细部信息。通常的做法是采用数字化地形图或由GPS获取的控制点坐标对卫星遥感影像进行几何校正,并结合DEM数据进行倾斜改正和投影差改正,重采样得到正射遥感影像。还可利用DEM进行直观的三维显示和分析,直接提取出地面高程、坡度、坡向等地形信息^[13]。然后,根据滑坡的成因确定某一特定区域发生滑坡的可能性。

另外,根据遥感影像差分也可判断出滑坡的发生区域。通过对多时相影像进行光谱比值分析,弥补由于前、后时相大气条件不同所引起的亮度变化^[14]。然后,从前、后时相波段比值图像的灰度值直方图中,确定出研究区内土地利用变化的百分比。对前、后时相波段比值图像对进行图像差分,并根据土地利用变化百分比确定出波段比值差分图像的灰度阈值。具有土地覆盖变化的像元灰阶较高,超出该阈值的即为变化区域。再结合DTM所生成的坡度影像,将变化区域进一步局限在陡边坡区域,即可判断出滑坡区域。

2.2 滑坡的监测

在监测阶段,通过检测多时相卫星影像上滑坡前后的土地利用变化来定位滑坡。然后,通过对比不同时期的滑坡条件(landslide condition),如滑坡范围、移动速度、地表形态、土壤湿度,进行滑坡监测。

目前,滑坡运动监测或制图大部分已经采用了InSAR或D-InSAR。采用ERS数据生成干涉DEM,并利用从1/50 000地形图获取的地面控制点改进地理编码和高程值^[15]。同时,利用Earth View-InSAR

软件包对所有基线小于100 m的影像对进行处理,获取地理编码垂直高程变化图(geocoded vertical elevation change maps)。由此,辨识出边坡的位移,证明其不稳定,在滑坡真正发生之前进行预测。然后,从滑坡堆积带的野外和航片中,分别选出三个主要为粗略纹理、中等纹理以及细碎片的不同区域,进行局部直方图分析,并采用RADARSAT精细模式,量测SAR影像纹理,进一步找出滑坡碎片的大小及分布。

2.3 滑坡的空间分析研究

滑坡活动是一项重要的地学指标,会产生很大的社会经济影响^[16]。因此,滑坡空间分析阶段的核心是根据滑坡危险程度划分等级,并利用遥感技术进行灾害区划。

利用遥感技术获取地貌、土地利用及地质细部信息,以分析滑坡与起因之间的关系。采用面向对象模型,对个体滑坡的各种属性赋值,可以量化描述这种空间关系^[17]。在此基础上,整合滑坡事件数据库与起因数据库,并计算出滑坡分布的直方图及起因的因素值,表达出两者之间的一般关系;接着,采用空间叠加算法估计滑坡与成因之间的空间相关性,并根据统计相关性分析滑坡的空间分布格局。根据地表粗糙度的空间格局,滑坡区与非滑坡区可区分开来,进行灾害区划。该方法客观地描述了滑坡,不仅有助于推测滑坡的发生机理,而且可以用于评估近期发生的滑坡活动,并根据与滑坡相关的环境属性划分其危害等级。

此外,根据遥感影像生成的滑坡库存地图中的某些指标,决策者或经济学家可评估出滑坡问题的严重性以及减灾措施的可行性与收益。

3 地统计分析方法及其遥感应用

地统计分析方法是GIS空间分析工具的一个非常重要的补充,将其应用于遥感影像能提高影像信息提取的准确性。该分析方法的主要用途是通过估计变量之间的空间自相关,预测疏散数据中未采样点处的抽样属性^[18]。这些数据往往采集费用较高,因此该方法是在不确定及信息有限的情况下进行的一种预测。为了弥补数据不足的缺陷,地统计在随机理论的基础上发展了一系列方法,并在分析中融合了很多辅助数据,其应用领域已从最初的采矿业发展到了土壤科学、图像压缩、生物及传染病学等。

3.1 地统计分析原理

地统计分析的理论基础是区域化变量理论,同

时考虑了空间分布变量的两种特性——随机性和结构性。区域化变量之间具有空间相关性,可采用变异函数模拟出其空间相关结构。当测量结果有限时,该分析方法便将统计变异作为提高未采样点预测质量的重要信息资源。

假定区域 A , 有一系列观测值 $Z(x_i)$, ($i = 1, \dots$), 代表该区域内的空间坐标点。 $Z(x_k)$ 对应着一个固定点 x_k , 并且每一个 $Z(x_i)$ 可以看作区域内某一随机变量的一个特定现实(realization), 则区域化变量 $Z(x_i)$ (所有的 x_i 都位于区域 A 内) 便可以看作一系列随机变量的一个现实, 我们称这组随机变量为一个随机函数^[19]。相距 h 的点 x 和 $x+h$ 处的变量 $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$ 之间有一定的统计关系, 将两者方差的一半定义为区域化变量 $Z(x)$ 的变异函数, 公式如下^[20]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E [Z(x) - Z(x+h)]^2$$

由上式可以看出估计变异函数值, 需要求出 $[Z(x) - Z(x+h)]^2$ 的数学期望, 因此需要若干对 $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$, 但空间上只能得到一对抽样值, 因此针对区域化变量提出了二阶平稳假设和本证假设^[21]。在应用中, 区域化变量理论假定区域中任意两点之间的协方差函数只与距离和方向有关, 与位置无关。基于这种假设, 协方差变异函数测定了区域化变量观测值之间的相关关系, 记为:

$$\gamma_v(h) = C(o) - C(h)$$

地统计分析的另一重要内容是, 在区域化变量理论的基础上, 对未知点进行最优估计, 并进行地统计插值。地统计插值(通常为克里格)是随机的, 与确定性技术(如趋势面)相比较具有很大的优点。确定性技术以唯一的方式预测未知值, 没有不确定性的相关测量。随机技术提供了一些可能值, 并附有发生的概率。此外, 地统计技术还能利用相邻观测之间的空间相关, 预测未采样点处的值, 并可通过估计值方差平面表现出与插值相关的误差及不确定性^[22]。

3.2 地统计在遥感中的应用

遥感影像的邻近像元之间存在着空间相关性。地统计方法将该空间相关性量化并融入空间分析过程中, 利用这些空间信息不仅可以进行影像预处理与影像分类, 还可以根据量化后的空间相关性平滑分类后影像, 并进行空间格局分析。

3.2.1 影像预处理

由于地面高程的变化和轨道参数, 遥感影像都存在着几何畸变, 需要通过地面控制点进行几何校正^[23]。地面高程变异是随机的, 利用地统计方法进行影像纠正, 充分考虑到了其随机特性。先通过多项式模拟出随机域的趋势, 并将其残差作为二阶平稳随机域, 分别计算 X 、 Y 方向上残差的空间变异函数, 模拟出空间变异结构, 即可找出主要变异方向。再运用普通克里格方法进行残差随机域的空间插值。根据克里格估计, 计算出对应的影像坐标, 通过重采样进行影像纠正。经过交叉验证, 该方法最终产生的方差及均值平方根都较传统方法小很多。

采用地统计方法, 还可以过滤原始影像以提取纹理波段用于分类。为了充分利用空间相关及光谱波段相关, 采用主成分分析法对所有光谱进行多变量统计分析。主成分分析法不仅减少了影像的维数, 同时也不需要任何目标光谱特征的先验信息^[24]。再采用阶乘克里格在第一主成分上对噪声与区域背景进行地统计滤除, 利用空间自相关格局来滤除背景信号。最后, 通过计算空间自相关的局部指标来探测出高或低反射值与变异的局部聚类。在每一个滤除处理后的位置, 对比探测核心值及其周围值, 如果差异明显即定为变异。该方法不但可以探测到抽样数据中的异常值, 还可用于探测影像中的地表变异。

3.2.2 影像分类

遥感影像的邻近像元之间存在着空间相关性。地统计方法可以通过计算变异函数等方式量化遥感影像本身所含有的空间相关性, 并且利用这些空间信息进行影像分类^[25]。同时, 由于遥感影像纹理会随着空间发生变化, 将纹理数据与光谱数据结合用于分类, 能取得更好的分类效果^[26]。

首先, 在局部窗口(local window)中计算变异函数, 将其作为空间加权函数, 进行纹理量测。根据不同步长半变异函数所得的纹理信息, 采用各种监督分类法就可以对像元进行分类。假定邻近像元之间非独立, 其依赖性能量化且能合并入分类器中。在两个最具有代表性的辐射波段主成分上采用移动窗口, 邻像元之间具体的滞后距离根据纹理量测确定, 这样就能量化局部层次上辐射数据的空间变异性。在此基础上, 利用计算机程序将多波段影像纹理输出为文件, 作为附加信息应用在分类过程中^[27]。

此外, 为了减少由简单的逐像元光谱分类所产生的不准确性, 可以采用地统计方法, 量化邻近像

元之间的空间依赖性,用于平滑分类后影像,可以提高信息提取准确性。通常的做法是将变异函数作为空间加权函数,在此基础上平滑局部值,并进行克里格最优估计。最后,可根据分类后的影像判读出滑坡周界,确定出滑坡的范围^[28]。

3.2.3 空间格局分析

空间格局分析需要高分辨率大范围的空间加密数据。遥感数据具有细节化、空间上完整且易获取的特点,是空间格局分析的重要数据源。又因为野外数据疏散且难以采集,通常情况下将此两种数据耦合,通过野外测量及计算影像生成的景观(landscape)变量的半变异函数来分析其空间结构,并采用随机建模形式全面地研究其空间格局的组成^[29]。

同时,由于空间变量之间存在着密切关系,地统计方法可根据抽样测量值进行预测和模拟,并进行空间变异建模。由此,可描述出感兴趣变量空间变异的尺度与格局,并能生成该变量的分布表面^[30]。将各变量叠加,可生成量化等级灰度图。根据所选影响变量的空间格局,不仅可将滑坡区与非滑坡区分开来,还可进行灾害等级划分。该方法客观地描述了滑坡,不仅有助于推测滑坡的发生机理,而且可以用于评估近期发生的滑坡活动,并根据与滑坡相关的环境属性划分其危害等级。

4 地统计方法在滑坡遥感监测中的应用展望

在影像预处理阶段,针对遥感影像在地形起伏较大区域产生的较严重几何畸变,需要进行影像纠正。结合地统计方法,在多项式趋势制图的基础上,采用普通克里格进行残差随机域的空间插值,纠正精度比较高。然后,可利用 DEM 数据对其进行正射纠正^[31]。由于通过数字化地形图等高线获取的 DEM 数据比例尺比较小,所以需要借助 ArcGIS 对其进行 Kriging 插值,以满足纠正的需要。

此外,在影像自动分类前进行主成分变换处理,可以减少分类过程中的计算量,提高计算效率^[32]。因此,先根据研究区的地形条件及数据源,选定感兴趣的监测变量。然后,对影像进行主成分分析。通过主成分增强,并采用克里格方法滤除噪声,能更清晰地探测出空间变异,分类效率得以提高。

由于空间变量存在着空间自相关性,因此在一定的范围内,滑坡监测数据的观测值是相关的。利

用地统计方法量测纹理进行影像分类,并根据分类后的影像数据,确定出滑坡范围。同时,还可制作成土地覆盖分类的细部数字化专题地图。然后,根据空间格局分析,探测出地表高程的空间变异,生成高程平面,并可探测滑坡即将发生的范围,达到预测的目的。

最后,根据判读分类后影像,提取出土地覆盖类型以及地表水系数据,并根据 DEM 数据提取出坡度、坡向、坡高等信息。采用地统计空间分析技术,对以上滑坡各影响因子进行量化分析,生成影响因子量化图,继而生成滑坡危害等级图,并据此划分出滑坡危险程度等级。对于滑坡已发生区域,还可根据分类后影像差分识别出滑坡周界,利用 DEM 数据计算出滑坡体积,用以判断滑坡规模。在此基础上,结合遥感技术进行灾害区划,为灾害的防治与管理提供科学依据。

参考文献

- [1] 王小刚,高德恒.交会法进行滑坡监测的技术应用[J].珠江现代建设,2006(6):31-35.
- [2] Squarzoni C, Delacourt C, Allemand P. Differential single-frequency GPS monitoring of the La Valette landslide (French Alps) [J]. Engineering Geology, 2005,79: 215-229.
- [3] 周拥军,寇新建,任伟中.数字近景摄影测量在模型试验平面位移场测量中的应用[J].勘察科学技术,2004(5):26-30.
- [4] 林水通.滑坡灾害监测方法综述[J].福建建筑,2006(5):73-74.
- [5] 赵宏金,曾旭平.GPS 高程在滑坡监测中应用研究[J].人民长江,2000,31(8):44-46.
- [6] 曾旭平.GPS 滑坡高程监测的数据处理问题[J].武汉大学学报(信息科学版),2004,29(3):201-204.
- [7] 霍志涛,张业明,金维群,等.三峡库区滑坡监测中的新技术和新方法[J].华南地质与矿产,2006(4):69-74.
- [8] 王国辉,马莉,彭宝富.数字化近景摄影测量监测隧道洞室位移新技术的应用[J].铁道建筑,2005(11):40-41.
- [9] 顾峰华,高井祥,仇春平.近景摄影测量监测小变形体的误差分析与精度评定[J].矿山测量,2005(2):43-48.
- [10] 王秀美,贺跃光,曾卓乔.数字化近景摄影测量系统在滑坡监测中的应用[J].测绘通报,2002(2):28-30.
- [11] 李铁锋,徐岳仁.基于多期 SPOT-5 影像的降雨型浅层滑坡遥感解译研究[J].北京大学学报(自然科学版)网络版(预印本),2006,1(3):1-7.
- [12] Graciela Metternicht, Lorenz Humi. Remote sensing of landside: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments [J]. Remote sensing of Environment, 2005,98: 284-303.

- [13] 濮国梁,杨武年等.正射遥感影像地图制作技术在岷江上游滑坡研究中的应用[J].成都理工学院学报,2000,27(3): 312-317.
- [14] Cheng K S, Wei C, Chang S C. Locating landslide using multi-temporal satellite images [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33: 296-301.
- [15] Singhroy V, Molch K. Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33: 290-295.
- [16] Canutic P, Casagli N, Ermini L, et al. Landslide activity as a geoinicator in Italy: significance and new perspectives from remote sensing[J]. *Environmental Geology*, 2004, 45: 907-919.
- [17] Zhou C H, Lee C F, Li J, et al. On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong [J]. *Geomorphology*, 2002, 43: 197-207.
- [18] Burrough P A. GIS and geostatistics: Essential partners for spatial analysis [J]. *Environmental and Ecological Statistics*, 2001, 8: 361-377.
- [19] Mahmoud M. Moustafa. A geostatistical approach to optimize the determination of saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage design in Egypt [J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 42: 291-312.
- [20] Alexander Ploner, Rudolf Dutter. New directions in geostatistics [J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2000, 91: 499-509.
- [21] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999.
- [22] Els Verfaillie, Vera Van Lancker, Marc Van Meirvenne. Multivariate geostatistics for the predictive modeling of the surficial sand distribution in shelf seas [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26: 2 454-2 468.
- [23] Ke Sheng Cheng, Hui Chung Yeh, Chang Hsuan Tsai. An anisotropic spatial modeling approach for remote sensing image rectification [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 73: 46-54.
- [24] Pierre Goovaerts, Geoffrey M, Jacquez, Andrew Marcus. Geostatistical and local cluster analysis of high resolution hyperspectral imagery for detection of anomalies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95: 351-367.
- [25] Atkinson P M, Lewis P. Geostatistical classification for remote sensing: an introduction [J]. *Computers & Geosciences*, 2000, 26: 361-371.
- [26] 刘新华,舒宁.纹理特征在多光谱遥感影像分类中的应用[J].测绘信息与工程,2006,31(3):31-32.
- [27] M Chica-Olmo, F Abarca-Hernández. Computing geostatistical image texture for remotely sensed data classification [J]. *Computers & Geosciences*, 2000, 26: 373-383.
- [28] S de Bruin. Predicting the areal extent of land-cover types using classified imagery and geostatistics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74: 387-396.
- [29] Agustín Lobo, Kirk Moloney. Analysis of fine-scale spatial pattern of a grassland from remotely-sensed imagery and field collected data [J]. *Landscape Ecology*, 1998, 13: 111-131.
- [30] Mercedes Berterretche, Andrew T, Hudak. Comparison of regression and geostatistical methods for mapping Leaf Area Index (LAI) with Landsat ETM+ data over a boreal forest [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96: 49-61.
- [31] 李加洪,蒋卫国,张松梅,等.基于遥感与GIS的西藏帕里河滑坡动态监测分析[J].自然灾害学报,2006,15(4):24-27.
- [32] Thomas M, Lillesand, Ralph W. Kiefer 著.彭望禄等译.遥感与图像解译(第四版).[M].北京:电子工业出版社,2003.

Study on Monitoring Landslides Based on RS and Geostatistics

ZHANG Shu-hui, GE Ying, HE Xiu-feng, LI Xin-yu, WANG Wei-na

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098, China)

Abstract: Generally, traditional methods for monitoring landslides are limited by weather and topographic conditions. Mainly because of the ability of continuous monitoring, remote sensing is used in detecting landslide activity in a timely manner. On the basis of post-classification remote sensing images, the information of landslide conditions can be directly obtained and used for the landslide hazard assessment by comparing data of different periods. Furthermore, making the best use of spatial correlation included in remote sensing data, geostatistical approach can improve the accuracy of image information extraction. And so the integration of the two technologies is of great application perspective.

Key words: monitoring landslides; remote sensing; geostatistics