

卫星遥感技术在火山监测中的应用

于泳, 洪汉净, 刘培洵, 陶玮, 郑秀珍

(中国地震局地质研究所, 中国地震局火山研究中心, 北京 100029)

摘要 作为一门新兴技术, 卫星遥感已被有效地应用于火山活动监测. 通过 SAR(合成孔径雷达)和 InSAR(合成孔径雷达干涉成像)资料可以监测火山地表形变. 使用热辐射数据以及将遥感与其它技术相结合能够研究火山区的热活动和火山喷发物. 在我国的火山监测中, 广泛地应用卫星遥感技术是非常必要的.

关键词 卫星遥感, 火山监测, 合成孔径雷达干涉技术, 形变, 热活动

中图分类号 P627

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2003)01-0079-06

The application of satellite remote sensing in volcano monitoring

YU Yong, HONG Han-jing, LIU Pei-xun, TAO Wei, ZHENG Xiu-zhen

(Institute of Geology and Volcano Research Center, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China)

Abstract As a new technique, Satellite remote sensing has been effectively applied in volcano monitoring. Volcano ground deformation can be well researched by means of SAR and InSAR. The study of thermal activity and volcanic ejecta in terms of thermal radiation data and the combination of remote sensing and other techniques is presented. It is urgent to apply remote sensing data to volcano monitoring of our country.

Keywords remote sensing, volcano monitoring, InSAR, deformation, thermal activity

0 引言

遥感科学是物理学、计算数学、电子计算技术、航天、航空和地学等许多科学密切结合的综合性学科, 现已被广泛地应用于军事、气象、海洋、农业、水利和铁路建设等方面, 同时也为地质科学领域提供了一种新的研究手段. 火山喷发是地壳运动的一种表现形式, 也是地球内部热能在地表的强烈显示. 火山喷发是最严重的地质灾害之一. 据统计, 全球每年约有 50~65 座火山喷发, 对人类的生活构成了极大威胁^[1]. 为了防御和减轻火山灾害, 需要积极开展火山活动的监测和预报工作. 尽管地质、地球物理和地球化学等手段已被广泛地应用于火山研究, 但这些方法耗费大量人力物力, 并具有很大的危险性. 而遥感方法却能够对火山进行安全、有效、周期性地远距离观测. 目前, 遥感已被用于包括火山地形和地质构造分析、绘制火山岩分布图、地表温度监测、火山

气体含量估计、追踪喷发柱、水颜色变化分析、建立数字高程模型和地壳变形等火山学研究中. 本文从遥感的基本概念入手, 介绍陆地卫星和气象卫星的发展并综述了卫星遥感在火山监测中的应用.

1 遥感的基本概念

遥感的定义有广义遥感和狭义遥感两种, 前者是指这种方法不需要直接与目标物接触, 但必须获得目标物的某些信息, 如目标物的电磁波辐射(包括发射、吸收、反射和透射)特征、力场(包括重力、磁力)特征和机械波(包括地震波、声波)特征等信息来进行识别和探测的遥感技术; 狭义遥感是指从一定距离对地表和近地表的的目标物从紫外到微波波段的电磁波的发射和反射现象进行探测, 从而达到识别目标物的理论和方法.

遥感科学技术研究的领域非常广泛, 它的研究对象基本上包括两大类: 宇宙遥感和地球遥感. 地球

收稿日期 2002-06-17; 修回日期 2002-09-10.

基金项目 科技部社会公益研究重点专项(2001DIA10003)、十五国家科技攻关计划(2001BA601B06)和科技部社会公益研究专项(2000DIA10200)共同资助.

作者简介 于泳, 1972 年生, 吉林白城人, 2002 年于中国地震局地质研究所获博士学位, 现为中国地震局地质研究所助理研究员, 主要研究方向为地球动力学数值模拟 (Email: seis2002@sina.com).

遥感包括航空遥感、航天遥感和地面(水面)遥感等三个方面,当前发展最快、最受重视的是航天遥感工作。航天遥感以卫星遥感为主,人造地球卫星给多种传感器提供离地面更高的工作平台,使传感器具有更广阔的视野;卫星的恒定轨道,加上地球本身的运转,使卫星遥感可以不受国界和地形的限制并可以对全球做连续观测。

航空遥感是航空摄影的发展,它以飞机或气球作为工作平台,其上装有各种传感器,包括摄影仪等。对观测地区按规定的技术要求,收集有关地物的电磁波信息,经过对信息的传输、处理,最后获得各种图像、数据或曲线资料,这样的全部过程称为航空遥感。航空像片包括黑白和彩色像片,黑白和彩色红外像片、紫外像片、雷达像片等^[2]。

2 遥感卫星的发展

美国于 1972 年发射了陆地卫星(LANDSAT)序列中的 LANDSAT-1。迄今为止, LANDSAT 序列已发射了 7 颗。法国于 1987 年发射了地球观察卫星 SPOT 序列中的 SPOT-1, 1990 和 1993 年分别发射了 SPOT-2 和 SPOT-3。欧洲宇航局于 1991 和 1995 年分别发射了欧洲遥感卫星 ERS-1 和 ERS-2, 载有包括雷达测高仪在内的一系列遥感仪器。日本于 1992 年发射了一颗地球资源卫星 JERS-1。加拿大于 1995 年发射了雷达卫星 RADARSAT-1。LANDSAT-7 和 RADARSAT-1 代表了卫星遥感目前的发展水平。LANDSAT 配备的 ETM+ (增强专题绘图仪) 用来测量地面反射或发射的太阳辐射, 包括空间分辨率为 15 m 的全色段和空间分辨率为 60m 的热红外信道。它还有一个 378 千兆比特的能够存储全球覆盖的固态记录器。因此 LANDSAT 获得的数据具有高空间分辨率、高质量的辐射和谱鉴别率。RADARSAT-1 上载有可以覆盖全球的磁带记录器, 还有一个地面 SAR 数据接收站网。同以前的卫星雷达成像器相比, RADARSAT-1 为地面分辨率、成像行宽和波束入射角提供了更宽的选择范围: SAR 扫描波束的成像行宽为 500km, 分辨率为 100m, 适于全球或区域尺度的综合观测; 精波速的成像行宽为 50km, 分辨率小于 10m, 有利于详细研究局部信息; 利用两个不同的成像波束入射角, 提供了第一个立体数据集^[3]。

1960 年 4 月美国第一颗极轨气象卫星问世, 人们开始通过卫星获得大气运动和云覆盖的信息。此后, 美国先后发射了 TIROS 系列、NIMBUS 系列、TIOS/ESSA 系列、ITOS/NOAA 系列和 TIROS-N/

NOAA 系列等极轨气象卫星。目前, 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)一直保持双星轨道(上午、下午各一颗)业务运行, 使全球同一地区, 每天都能获得四次卫星观测资料。欧洲从 1972 年至今, 先后发射了 7 颗静止气象卫星 Meteosat-1 ~ 7。日本从 1977 年开始, 已发射了 4 颗静止气象卫星 GMS-1 ~ 5^[4]。气象卫星作为宇宙空间遥感地球环境的一种观测手段, 它对地球大气的研究已取得了很大的进展, 云图和温度探测在全球范围获得成功。这些探测结果已被广泛地应用在大气、地震和火山等研究中。

3 卫星遥感在火山监测中的应用

火山监测, 是通过各种观察和观测手段, 来监测和检测地下岩浆的动态变化, 查明异常现象, 捕捉火山喷发前兆, 为火山喷发预报研究提供科学证据。

LANDSAT 和 JERS-1 对安第斯山脉中部的火山做了遥测。由 LANDSAT 的 TM(专题绘图仪)的图像表明, 在 1000 个以上的火山构造中, 44 个有活动潜势, 其中有很多海拔超过 6000 m 的大火山。JERS-1 的数据扩充了 LANDSAT 所提供的谱段和时间覆盖, 它的 SAR 图像揭示了从 LANDSAT 图像看不出的内部结构^[3]。在全球范围内对火山现象进行遥感观测, 其最大的实际意义是在火山喷发之前做出预报。靠近活动火山的地壳表面部分的形变、地热异常的出现和增强、地震现象、大气和地下水中某些气体分量的气体光谱或浓度的变化, 都是已知的和最可靠的火山喷发的前兆。遥感可以动态地研究火山作用, 记录到随时间变化的各种参数(几何参数、温度、气体光谱、物理场等)。在火山分布地区应用视野宽阔的遥感像片不仅能够研究火山活动现象本身, 并且对火山活动产物的分布面积进行填图, 而且还能够通过观察广大区域内深部运动的反映, 即地表现象, 获得有关火山现象与全区地质构造关系的特点, 监视该火山源随时间的发展情况或预测它的进一步演化。以下将从火山地表形变研究(包括火山地震)以及火山热活动和喷发物研究等二个方面来介绍卫星遥感在火山监测中的应用。

3.1 火山地表形变研究

火山地表形变即通常所说的地形变, 是指地下岩浆运动所引起的地表形状发生的畸变。它可能与火山地热系统中的流体压力与流速变化有关。与火山喷发相关的地形变一般有两种, 即火山近旁的局部隆起和周围大部分地区的沉降。在火山喷发过程中, 特别是喷发之前, 火山极易发生形变。火山监测

和喷发预报主要是根据地球物理资料和地球化学资料相结合来进行的.地面形变测量是地球物理手段中常见的一种,传统的地形变测量方法包括大地测量学中的水准测量、三角测量、三边测量、倾角测量和机载摄影等.近年来新发展起来的技术有 GPS(全球定位系统)、自动观测站(包括自动经纬仪和电子测距技术相结合)以及 InSAR(合成孔径雷达干涉成像技术)^[5].就传统技术而言,即使是 GPS,测量时需要大量的基点,测量范围要大到足以监测整个火山形变,同时又不能忽略某些具体细节;在工作中又可能存在着很多误差,例如两个 GPS 站被随意地放在同一个干涉仪边上,即使在形变发生时期也观测不到相对形变.雷达干涉技术是利用某一区域的多幅雷达图像来计算这一地区的地形或地表变化^[6-8].InSAR 克服了传统测地学的缺点,它为具有连续性数据的区域提供更广阔、更全面的图像^[9].

运用雷达图像进行研究与应用传统的航空照片相比具有很大的优越性.光学传感器记录的只是从地面反射的太阳方向的电磁辐射量,因此图像的象素就只能由所接收光线的亮度或幅度来反映.而雷达天线向目标发射的电磁波遵循正弦曲线模式,因此雷达仪器既能够测量返回波的幅度,还能精确测量其振动的位置,即相位.测量相位就使距离测量的精度达到厘米级甚至毫米级.雷达卫星通过对比在同一位置获得的多幅连续的卫星图像的相对应象素之间相位的改变来追踪地球表面微小的变化.但要进行精确测量,除了测量目标在雷达获取全部图像的过程中保持不变外,获取雷达图像的位置也要一致.对于成功的干涉测量,雷达卫星飞行的两条路径相距不能超过 1 km 远(确切的距离值依赖于具体采用的雷达卫星和观察的几何位置).目前正在运行的四颗雷达卫星加拿大的 Radarsat、欧洲的 ERS-1 和 ERS-2 以及日本的 JERS-1 都满足这一条件.

Lundgren 应用 InSAR 研究了意大利卡姆富莱各里(Campi Flegrei)火山口的形变,在 1993~1998 年期间发生沉降,沉降速率约为 38 ± 2 mm/a,1993~1995 年的沉降幅度和速率均小于 1995~1998 年^[10].运用干涉图像时序转换方法做出的时序形变结果与水准测量观测到的垂直沉降幅度相吻合^[11].

Lu 等人利用 InSAR 计算高程和高程变化的基本原理,以阿拉斯加的奥克莫克火山(Okmok)为例,详细讨论了干涉合成孔径雷达技术在监测火山形变上的应用.根据 ERS-1 和 ERS-2 的 SAR 干涉成像资料表明 1997 年 2~4 月期间奥克莫克火山喷发造成

了其火山口沉降.根据 ERS-1/ERS-2 C 波段的干涉图像推断奥克莫克火山:

- (1) 1992~1995 年抬升了 18 cm;
- (2) 1997 年 2~4 月期间的喷发造成火山口沉降 140 cm;
- (3) 喷发后第一年抬升 10 cm;
- (4) 运用点源收缩模型推断收缩源位于火山口正下方 2.7 km 处;
- (5) 喷发物的体积至少有 0.055 km^3 ,1997 年熔岩流的平均厚度估计有 7.4 m ^[9,12].这表明 SAR 干涉成像技术对遥测火山是很有应用远景的.

阿拉斯加有 40 多座活动火山位于频繁的国际航线之下,利用卫星遥感监测与火山喷发有关的地面形变,有着特别重要的意义.现已开始利用基于 ERS-1 数据的卫星遥感手段来监测这些火山的形变.载有成像雷达的飞机和航天飞机,其作用等同于卫星遥感.运用机载 SAR 地形测量得出了夏威夷基拉韦厄(Kilauea)火山、意大利维苏威(Vesuvius)火山和加拉帕戈斯(Galapagos)火山的高分辨率数字高程模型,并由此可以估计这些火山熔岩流场的结构和具体形态^[3].

1994 年,航天飞机上装载的 SIR-C/X SAR(航天飞机成像雷达)做了两次飞行,它于 10 月 7~10 日收集了 4 次正在喷发的基拉韦厄火山的数据,由此得出了该火山正在发展的绳状熔岩流的图像.它每天都可测绘新的熔岩流面积,从而估算出整个熔岩流场的质量喷发率.飞行中还取得了其它十几座火山的图像,这些图像不仅可以用作这些火山将来由于喷发而引起变化的检测基准,而且也可制作高质量的数字高程模型,以估计未来的熔岩流、泥流和火山碎屑流引起的灾害^[3].

火山地震是由岩浆活动引起的一种非构造成因的地震,一般都发生在火山及其附近,震源深度浅($< 10 \text{ km}$),多为浅表地震,弱震发生的频度高,常以震群形式出现.大量的火山喷发事件表明,火山地震是火山活动最明显的前兆标志,它将导致火山地表形变.1996 年 3 月,阿拉斯加阿库坦(Akutan)火山弧内的阿库坦岛下面发生了一个强烈的火山—构造地震群(最高达 5.1 级),产生了大量的地表裂缝,但并没有引起火山喷发. InSAR 资料揭示了整个岛的地表变形:包括阿库坦火山在内的岛西部地区向上运动,而岛东部则向下运动;变形轴与岛西部新的地表裂缝和岛东部被这次震群激发的全新世正断层在一条直线上,它大致与这个地区的最大正压应力方

向平行;在震群发生的前 4 年和后 2 年中,火山顶部火山口周围的地面运动均小于 $2.83 \text{ cm}^{[12]}$. Lu 等模拟了浅层、东—西走向、北倾的岩脉和火山下面深部的 Mogi 类型岩浆体的膨胀变形. 火山下的岩浆侵入可能是岛东部拉伸和沉降的原因.

Malassingne 等介绍了一种新的监测火山形变的工具—地面基地雷达,它适用于任何天气、具有高取样率(几秒一次),不需角形反射器也能监测表面形变^[13]. 与 InSAR 数据相比,地面基地雷达具有更小的空间分辨率(几十米而不是几百米),数据更新也比较快(几秒而不是几天).

3.2 火山热活动和喷发物的研究

在火山喷发过程中炽热岩浆的喷溢、火山爆炸等都是热能释放的表现. 可以说,火山热活动是火山活动的主要特征. 火山热活动不仅表现在火山的喷发期,而且在非火山喷发期热量也在不断地释放,这主要表现在火山区内气体的排放、温泉活动和地热异常等. 因此,热辐射数据是遥测火山的一个有力的工具,特别是多波段、具有不同时间和空间分辨率的数据^[14,15].

温度是火山监测的一项重要指标. 火山喷发前兆期一般要发生突发性地热异常(增温 $3 \sim 6^\circ\text{C}$),异常区面积达几百至几千平方公里,持续时间可从数小时至数天. 据此特征,可采用气象卫星的热红外波段数据结合火山灾害分布图重点进行火山区的热红外遥感解译,取得正常异常区的范围,从而重点、连续地监测并做到实时预报^[16].

在火山喷发过程中,任何剧烈的火山口活动都伴随有气体从岩浆中逸出现象,因此详细的逸出气体资料对分析喷发机制和预报未来喷发状态是非常重要的^[17]. 喷气孔活动增强常伴随围岩温度升高以及喷气孔周围热区面积增大的现象. 这些特征使卫星红外辐射计在喷气孔探测到的热吸收辐射增加. 应用短波红外辐射估计拉斯卡尔(Lascar)火山喷气孔释放气体的状态和火山区持续的岩浆活动情况^[18].

被动红外光谱分析用于监测 17 km 外的火山气体,证明对研究墨西哥 1997 年 2 月 25 ~ 26 日波波卡特佩特(Popocatepetl)火山喷发喷出的气体成分在短周期内的变化具有很高的精确度. 在喷发的前几天, SiF_4/SO_2 值呈线性增加,而喷发后的几个小时里,其比值下降了 10 倍^[19].

Kaneko 等人运用 Landsat 5 卫星的 TM 图像的短波红外热数据分析了日本有珠(Usu)火山一期喷发,

识别出两个独立的由于持续喷发活动形成的高温区,分别为与喷气孔有关的地区和与新的岩浆渗流有关的地区,并进一步分析了喷气孔的气体 and 岩浆流的性质与红外辐射数据的关系^[20].

热辐射作用导致的熔岩流表面温度的急剧下降,其冷却满足关系式

$$dT/dt = a + bT^4, \quad (1)$$

T 是表面温度, t 是时间, a 、 b 为常数^[21]. 对基拉韦厄火山的玄武质绳状熔岩, Hon 等人给出了经验关系式

$$T = 303 - 140 \log(t) \quad [22]. \quad (2)$$

这表明暴露的熔岩表面温度从 1100°C 冷却到 600°C 只需 2.4 min , 冷却到 100°C 约需 28 h . 但是,在喷发过程中,熔岩不断地或间歇性地涌出,不停地将热量供给熔岩表面,使其温度保持在喷发时的温度. 直到熔岩停止喷发,高温表面才会快速冷却. 因此在高温时,温度发生明显、突然的迅速降低和吸收辐射下降可以判断火山喷发停止. Aries 等人通过分析冰岛克拉夫拉(Krafla)火山 5 次喷发的 AVHRR(高级甚高分辨率辐射计)数据验证了这一点^[23]. 在所有喷发过程中,在已知喷发中断时间后的第一张图像中, $3.9 \mu\text{m}$ 的辐射与喷发过程中的辐射能量相比大幅度降低,随后稳定地保持在低值处.

通过运用 Landsat TM 资料, Wooster 等人确定了日本云仙岳(Unzen)火山 1991 ~ 1993 年的活动熔岩丘的热结构^[24]. 由于 TM 图像均为晚上获得,同时又有增补的数据(为用于恢复熔岩丘表面热结构的模型提供参数),因此 TM 的数据质量相当高. 这些数据与当时的地质概略图相结合,以区分与熔岩丘不同活动类型的 TM 像素组,熔岩丘的活动类型有出气口喷气、外成和内成熔岩丘生长、岩块和火山尘堆积物、小型火山碎屑流和坠石. 用 TM 温度分布的空间和统计特征,可以制定出分类评判规则,通过这些规则来确定基于遥感数据热结构的熔岩丘活动类型. 通过分析 TM 图像,仅使用热点温度的统计分布便能区分熔岩丘的喷气口活动区、活动穹丘生长区和倒塌堆积区,这三个不同区域的热点统计温度依次降低,而面积增大. 内成和外成活动穹丘生长区可通过热点的空间分布特征区分:外成活动穹丘以新岩浆排气口和倒塌的舌状前缘为特征,在只有内成活动穹丘生长区是没有这些现象的.

2000 年 7 月 20 日,智利拉斯卡尔火山喷发,产生的火山灰柱高达 10 m , 1984 ~ 1993 年期间内 4 次大规模的火山喷发的遥感数据表明拉斯卡尔火山大

的喷发活动之前在火山口有明显的冷却现象发生,这说明特征性的热辐射趋势可作为遥测到的喷发预兆.但是 2000 年喷发之前的红外辐射特征与以往不同,表明拉斯卡尔火山在 1993 年的历史上最大的喷发之后,火山活动性发生了改变^[25].

火山喷发热柱的海拔高达 40 km^[26],火山灰沉降面积达几万平方公里^[27]. Gaze 等人在处理遥感数据时应用照相测斜术确定了阿拉斯加的雷道特(Redoubt)火山喷发热柱上部光学表面的三维高度和地形^[28].

根据雷达气象学知识,可推断,火山喷发物通过以下三种机制产生雷达回波:由于喷发物内部紊乱引起折射率指数的空间异常而产生布拉格散射;由于喷射出的颗粒小于雷达波长而产生雷利散射;由于颗粒大于而产生米氏散射.根据回波就能够计算出喷发物的垂向喷发速度. Dubosclard 等人开发了中等功率的多普勒雷达,工作波段为 UHF,命名为 Voldorad^[29].可在不同天气监测中等距离(0.5~5 km)的不同级别的喷发活动,填补了以往低功率和高功率雷达以及声达系统在观测火山中的空白.在 1998 年 10 月 11~12 日圣海伦斯(St. Helens)火山喷发中首次应用 Voldorad 在距离火山排气孔 1 km 远处记录下的多普勒谱揭示在喷发阵发期的回波较强,并随喷发活动衰退而减弱.喷发物喷射的垂向速度平均为 80~87 m/s.

4 结 语

利用卫星遥感技术监测火山活动性是近年来新发展起来的一种快速、经济而有效的方法.在全球 55 个火山观测所中,普遍或较普遍采用的火山监测技术是火山地震学方法(92%的观测所采用)、地形变测量(71%)和火山气体地球化学观测(55%).大约有 1/3 的火山观测所还设有地热和地温场观测、重力及电磁监测等^[30].目前,遥感数据可广泛应用于上述提到的多种监测方法,如 SAR 和 InSAR 可用于监测火山形变,利用卫星热红外仪器很容易观测到火山区的热异常、热活动以及火山气体的逸出和变化等.

中国现代火山具有喷发时距长、喷发频率低和喷发类型单一等特点,但现在仍不同程度地存在着喷气活动、地热显示和火山性地震等特点^[1].尽管我国现代火山的喷发还未能给人们造成直接的灾害,尽管现代火山表现出的活动性较弱,但它们仍存在着潜在的喷发危险.我国最具潜在喷发性危险的活

火山主要分布在长白山、五大连池、台湾、雷琼、腾冲以及西昆仑阿瓦库勒等地,因此对现代火山的监测预报工作不容忽视.国外大量研究实例表明了遥感技术在火山监测和喷发预报中的成功应用,那么应用遥感新技术对我国的火山进行全面而深入的监测将具有重要意义.

参 考 文 献 (References):

- [1] 李玉锁,修济刚,李继泰,等.火山喷发机制和预报[M].北京:地震出版社,1998.
- [2] 朱亮璞,承继成,潘德扬,等.遥感图像地质解译教程[M].北京:地质出版社,1981.
- [3] 胡明城.卫星遥感技术的发展和最新成就[J].测绘科学,2000,25(1):25~28.
- [4] 许熙,郑文芳.国际气象卫星发展状况[A].见:陈运泰主编.地球与空间科学观测技术进展-庆祝秦馨菱院士八十寿辰[C].北京:地震出版社,529~536.
- [5] Massonnet D, Briole P, Arnaud A. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry [J]. Nature, 1995, 375: 567~570.
- [6] Gabriel A, Goldstein R, Zebker H. Mapping small elevation changes over large area: Differential radar interferometry [J]. J. Geophys. Res., 1989, 94: 9183~9191.
- [7] Massonnet D, Feigl K. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface [J]. Rev. Geophys., 1998, 36: 441~500.
- [8] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry [J]. Proc. IEEE, 2000, 88: 333~382.
- [9] Lu Z. Satellite radar interferometry and its application to detection of volcanic deformation [J]. 遥感信息, 1999, 1: 1~13.
- [10] Lundgren P, Usai S, Sansosti E, et al. Modeling surface deformation observed with synthetic aperture radar interferometry at Campi Flegrei caldera [J]. J. Geophys. Res., 2001, 106: 19355~19366.
- [11] Avallone A, Zollo A, Briole, Delacourt C, Beauducel F. Subsidence of Campi Flegrei (Italy) detected by SAR interferometry [J]. Geophys. Res. Lett., 1999, 26: 2303~2306.
- [12] Lu Z, Mann D, Freymueller J, et al. Synthetic aperture radar interferometry of Okmok volcano, Alaska 1: Radar observations [J]. J. Geophys. Res., 2000, 105: 10791~10806.
- [13] Malassingne C, Lemaître F. Potential of ground based radar for monitoring of deformation of volcanoes [J]. Geophys. Res. Lett., 2001, 28(5): 851~854.
- [14] Wooster MJ, Kaneko T. Satellite thermal analyses of lava dome effusion rates at Unzen Volcano, Japan [J]. J. Geophys. Res., 1998, 103: 20935~20947.
- [15] Harris A J L, Flynn L P, Dean K, et al. Real-time Satellite Monitoring of Volcanic Hotspots, in Remote Sensing of Active Volcanism [J]. Geophysical Monograph, 2000, 116: 139~159.
- [16] 张学霞,薄立群,常丽萍.用 3S 技术监测长白山火山方法研究[J].测绘工程,2000,9(4):22~24.
- [17] Oppenheimer, C, P W Francis, D A Rothery et al. Infrared image

- analysis of volcano , Chile 1984-1992 [J]. J. Geophys. Res. , 1993 , 98 : 4269 ~ 4286.
- [18] Wooster MJ , Rothery D A. Thermal monitoring of Lascar Volcano , Chile using infrared data from the Along Track Scanning Radiometer : a 1991-1995 time-series [J]. Bull. Volcano. , 1997 , 58 : 566 ~ 579.
- [19] Love S P , Giff F , Counce D , et al. Passive infrared spectroscopy of the eruption plume at popocatepetl volcano , Mexico [J]. Nature , 1998 , 396 : 563 ~ 567.
- [20] Kaneko T , Wooster MJ. Landsat infrared analysis of fumarole activity at Unzen Volcano : time-series comparison with gas and magma fluxes [J]. J. of Volcanology and Geothermal Res. , 1999 , 89 : 57 ~ 64.
- [21] Blake S. Comment on "Cooling and crystallization of lava in open channels, and the transition of pahoehoe to 'a'" [J]. Bull. Volcanol. , 2000 , 62 : 362 ~ 364.
- [22] Hon K , Kauahikaua J , Denlinger R , et al. Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows : observations and measurements of active lava flows on Kilauea volcano , Hawaii , Geol [J]. Soc. Am. Bull. , 1994 , 106 : 351 ~ 370.
- [23] Aries S E , Harris A J L , Rothery D A. Remote infrared detection of cessation of volcanic eruptions [J]. Geophys. Res. Lett. , 2001 , 28 (9) : 1803 ~ 1806.
- [24] Wooster MJ , Kaneko T , Nakada S , et al. Discrimination of lava dome activity styles using satellite-derived thermal structures [J]. J. Volcanology and Geothermal Res. , 2000 , 102 : 97 ~ 118.
- [25] Wooster MJ. Long-term infrared surveillance of Lascar Volcano : contrasting activity cycles and cooling pyroclastics [J] , Geophys. Res. Lett. , 2001 , 28 (5) : 847 ~ 850.
- [26] Holasek R E , Self S , Woods A W. Satellite observations and interpretation of the 1991 Mount Pinatubo eruption plumes [J]. J. Geophys. Res. , 1996 , 101 (27) : 27635 ~ 27655.
- [27] Sparks R S J. The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns [J] , Bull. Volcanol. , 1986 , 48 : 3 ~ 15.
- [28] Gaze L S , Wilson L , Muginis-Mark P J. Volcanic eruption plume top topography and heights as determined from photoclinometric analysis of satellite data [J]. J. Geophys. Res. , 1999 , 104 : 2989 ~ 3001.
- [29] Dubosclard G , Cordesses R , Allard P , et al. First testing of a volcano Doppler radar (Voldorad) at Mount Etna , Italy [J]. Geophys. Res. Lett. , 1999 , 26 (22) : 3389 ~ 3392.
- [30] 刘若新. 中国的活火山 [M]. 北京 : 地震出版社 , 2000 , 94 ~ 98.