



火山灰云遥感监测 方法与应用

李成范 刘 岚 著



上海大学出版社

火山灰云遥感监测方法与应用

李成范 刘 岚 著



上海大学出版社

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

火山灰云遥感监测方法与应用/李成范,刘岚著.
—上海:上海大学出版社,2016.8

ISBN 978-7-5671-2442-4

I. ①火… II. ①李… ②刘… III. ①遥感技术—应用—火山灰—监测 IV. ①P317.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 164671 号

责任编辑 管玉娟

封面设计 柯国富

技术编辑 章斐

火山灰云遥感监测方法与应用

李成范 刘岚 著

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.press.shu.edu.cn> 发行热线 021-66135112)

出版人:郭纯生

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海市印刷四厂印刷 各地新华书店经销

开本 787×960 1/16 印张 14.5 字数 250 千

2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5671-2442-4/P·005 定价:48.00 元

前 言

剧烈的火山喷发可以形成大片的火山灰云,它能够削弱到达地面的太阳辐射,引起酸雨、气温与降水异常、大气污染等全球或局地气候与环境系统的重大变化。与此同时,随着经济的飞速发展和全球一体化不断推进,国际航空运输业日益繁荣,火山灰云对航空安全的威胁也越来越凸显出来。于是,在火山灰云与航空安全研究中,火山灰云航空安全防灾减灾工作需要引起人们的高度重视,其中,建立火山灰云航空安全防灾减灾系统是降低由火山灰云引起的航空安全威胁的有效手段之一。

高效的火山灰云航空安全防灾减灾系统不仅需要做到自火山喷发的不同发展阶段进行火山灰云动态监测,而且还需要做到火山灰云扩散追踪和路径动态预测,为发布火山灰云航空安全预警提供信息保障,以及为火山灰云航空安全区划和防灾减灾提供科学指导。

遥感是在 1960 年代兴起并迅速发展起来的一门综合性对地观测技术,能够快速、准确地获取和分析地物空间动态变化信息。随着遥感传感器技术的进步,其提供的防灾减灾基础数据越来越清晰和多样化。半个多世纪以来,遥感技术在理论和应用方面都得到了迅速发展,在全球变化监测、资源调查与勘探、城乡规划以及城市自然灾害监测、预警和损失评估等诸多领域得到广泛应用。尤其是近年来,气象卫星和激光雷达遥感在火山灰云航空安全研究领域显示出极大的优越性,扩展了人们的观测视野,形成了对火山灰云航空安全进行水平和垂直监测的立体观测体系,已成为火山灰云与航空安全研究中重要的支撑技术。遥感技术在国民经济与社会发展中发挥着越来越重要的作

用,日益受到人们重视,该技术在各应用领域中的专业书籍也相继出版。目前,在国内外出版的有关遥感应用的书籍中,或偏重于总结概括,或偏重基础理论,尚未出现一本应用遥感技术讨论火山灰云与航空安全方面的著作。此外,在遥感相关研究和教学中及时更新和完善有关研究内容亦是遥感科学工作者义不容辞的责任和义务。

鉴于此,在国家自然科学基金项目(No. 41404024, No. 41172303)和上海市教委项目(No. 2014—2016)的资助下,我们编写了《火山灰云遥感监测方法与应用》一书。本书重点阐述了遥感的基本概念、技术体系、成像原理与图像特征、图像处理与解译应用、主成分分析、独立分量分析、支持向量机、变分贝叶斯 ICA 方法、火山灰云监测的研究现状、经济建设和社会发展需求等内容,注重遥感技术基础、发展和前沿,强调遥感技术在典型火山灰云监测案例中的应用,为后续进一步深入学习和开展研究工作奠定坚实基础。作为火山灰云与航空安全研究的阶段性成果,可供测绘、地质、环境、航空安全等专业学生学习及有关部门的专业技术人员阅读使用。

本书的编写目的是希望将遥感技术更好、更全面地应用于火山灰云航空安全防灾减灾建设,因此在内容上更加着重于介绍遥感基本原理和具体火山灰云监测方法及应用。由于遥感技术发展迅猛、日新月异,本书中对遥感新技术的介绍也不可能面面俱到,在具体应用时可根据自己的科研经验给予相应的补充。本书的整体结构由上海大学李成范博士确定。各章节的编写分工如下:第1章和第6章由李成范和刘岚编写;第2章至第5章由李成范编写。全书在分工编写的基础上,由李成范博士进行了初审和修改,并最终统一修改定稿。在编写过程中,硕士研究生戴羊羊、刘斐等同学协助收集、整理有关资料,并做了一些插图编辑和文字校对工作。

在本书编写出版过程中,作者所在的上海大学计算机工程与科学学院领导和同事给予了极大的关心、支持与帮助。此外,上海市地震局尹京苑研究员、黑龙江省地震局赵谊研究员、上海大学刘学锋教授、沈迪博士、董江山博士等对本书的编写提出了不少建设性建议,并给予了多方面的关心和指导。上海大学期刊社管玉娟编辑对本书成书过程中提供了大力支持和精心指导。在

此一并致以衷心的感谢。

本书是作者团队在长期研究实践过程中所取得成果的基础上进一步修订而成。在编写过程中,我们参考了国内外大量优秀教材、专著、研究论文等文献和相关网站资料,在此表示衷心感谢。虽然作者试图在参考文献中全部列出,但仍难免有疏漏之处,对部分未能在参考文献中列出的文献,在此表示深深的感谢。本书虽几易其稿,但不当之处仍在所难免,我们诚挚希望各位同行专家和读者提出宝贵意见和建议。由于受编写时间及作者水平之限,同时遥感与火山灰云航空安全防灾减灾技术不断丰富和迅速发展,因此本书也许不能全面反映最新研究成果,缺点和错误在所难免,恳请专家学者和广大读者批评指正,以便我们后续修订完善。

作 者

于上海大学

2016年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 问题的提出	1
1.1.1 火山灰云概述	1
1.1.2 火山灰云危害	2
1.1.3 问题的提出	3
§ 1.2 遥感概述	4
1.2.1 遥感基本概念	4
1.2.2 遥感过程与遥感技术系统	12
1.2.3 遥感发展简史	15
1.2.4 3S 集成技术	23
§ 1.3 遥感技术在火山灰云监测中的应用	27
1.3.1 火山灰云卫星遥感监测	27
1.3.2 研究现状	29
1.3.3 经济建设和社会发展需求	31
第 2 章 遥感物理基础	33
§ 2.1 物理基础	33
2.1.1 电磁波谱与电磁辐射	33
2.1.2 物体辐射特征	37
2.1.3 大气对太阳辐射的影响	40
2.1.4 微波的散射特性	45

§ 2.2	成像原理与图像特征	46
2.2.1	卫星遥感和影像特征	46
2.2.2	微波遥感与成像特征	55
2.2.3	合成孔径侧视雷达	57
§ 2.3	遥感图像处理	57
2.3.1	遥感图像复原	58
2.3.2	遥感图像增强	65
2.3.3	多源遥感数据融合	69
§ 2.4	遥感图像解译	71
2.4.1	遥感图像的目视解译	72
2.4.2	遥感图像的计算机解译	73
第 3 章	遥感技术用于火山灰云监测的方法研究	77
§ 3.1	基础理论	77
3.1.1	主成分分析	77
3.1.2	独立分量分析	80
3.1.3	支持向量机	86
3.1.4	变分贝叶斯 ICA 算法	90
§ 3.2	综合变分贝叶斯 ICA 与 SVM 的火山灰云遥感监测算法	95
3.2.1	综合变分贝叶斯 ICA 与 SVM 算法	95
3.2.2	火山灰云监测案例——以桑厄昂火山灰云为例	98
§ 3.3	综合 PCA - ICA 加权与 SVM 的火山灰云遥感监测算法	108
3.3.1	综合 PCA - ICA 加权与 SVM 算法	108
3.3.2	火山灰云监测案例——以桑厄昂火山灰云为例	118
§ 3.4	其他火山灰云遥感监测算法	122
3.4.1	火山灰云矿物成分及光谱特征	122
3.4.2	热红外差值法	124
3.4.3	假彩色合成法	128
3.4.4	紫外吸收法	130

3.4.5	可见光吸收法	132
3.4.6	改进型算法	132
第4章	遥感技术在火山灰云经典案例中的应用	134
§ 4.1	FY-3A 遥感数据在火山灰云监测中的应用	134
4.1.1	前言	134
4.1.2	FY-3A 卫星遥感数据概况	134
4.1.3	FY-3A 遥感数据在艾雅法拉火山灰云识别应用的 探讨	137
4.1.4	新方法在 FY-3A 遥感数据火山灰云识别应用中的 探讨	144
4.1.5	FY-3A 遥感数据火山灰云识别结果验证	148
§ 4.2	CALIOP 遥感数据在火山灰云监测中的应用	153
4.2.1	数据和方法	153
4.2.2	CALIOP 遥感数据在艾雅法拉火山灰云识别应用的 探讨	155
4.2.3	结论和讨论	163
第5章	火山灰沉降数值模拟与防灾减灾	165
§ 5.1	火山灰沉降数值模拟基础理论	165
5.1.1	理论模型选择	165
5.1.2	Suzuki 模型方程和参数	165
5.1.3	Suzuki 模型验证及改进	167
§ 5.2	火山灰沉降数值模拟	170
5.2.1	长白山天池火山灰沉降模拟	170
5.2.2	艾雅法拉火山灰沉降数值模拟	179
§ 5.3	艾雅法拉火山灰云分布和扩散	189
5.3.1	数据选取	189
5.3.2	艾雅法拉火山灰云分布区划	190

5.3.3	火山灰云分布遥感监测结果验证	198
§ 5.4	艾雅法拉火山灰云监测与防灾减灾	200
5.4.1	火山喷发的危害	200
5.4.2	艾雅法拉火山喷发的影响	201
5.4.3	艾雅法拉火山灰云的防灾减灾	202
第 6 章	结论与展望	206
§ 6.1	结论	206
§ 6.2	展望	207
参考文献		210
附录：英文缩略语		220



§ 1.1 问题的提出

1.1.1 火山灰云概述

1. 火山灰云案例

案例一：

1991年6月15日,菲律宾皮纳图博火山大爆发,喷发形成的大规模火山灰云(volcanic ash cloud, VAC)在短短一周之内就扩散到万里之外的非洲东海岸。据统计,此次火山灰云对民航客机的破坏非常大,导致机体和传感器等严重受损,先后有20余架飞机几乎报废,甚至连远在1000公里之外正常运行的民航客机机体和操作板等也都受到不同程度的损毁,事后的修复耗费了大约8000万美元。

案例二：

2010年3~4月期间,冰岛中南部的艾雅法拉火山开始喷发,尤其是4月14日开始的大喷发形成了大片火山灰云,并迅速向南扩散到北大西洋和欧洲大陆上空。由于缺少足够的监测手段和预测方法,英国率先全国性关闭各大机场和领空,禁止航班起降,随后各国相继效仿,最终导致北欧几乎所有的机场停运,整个空中交通陷入瘫痪状态,直接经济损失高达上千亿欧元。据事后估计,事先预估不足而采取的过度预防措施在一定程度上也加重了经济损失。

2. 火山灰云概念

火山是由穹状喷出物或熔岩流及固体碎屑围绕其喷出口堆积而成,散布

于世界各地。根据活动性可以将其划分为活火山、死火山和休眠火山三类。目前,全球已知的活火山有 523 座,死火山约有 2 000 座。尽管火山数量众多,但是从全球范围来看,火山分布并不均匀,主要集中在环太平洋及从印度尼西亚向北经缅甸、喜马拉雅山脉、中亚、西亚到地中海一带。

剧烈的火山喷发往往能够产生大量的火山碎屑颗粒、水汽和硫化物等,统称为火山喷发物。火山灰主要是由火山喷发出的直径小于 2 mm 的火山碎屑物构成。在一次火山爆发的喷发物中,火山灰碎屑成分最多,分布也最广。在火山喷发口初速度作用下,这些物质冲入高空充分混合形成酸性气溶胶,由于质量较轻,常飘浮在空中并堆积形成类似云层的灰云(简称火山灰云),在风速、重力和地球自转等外力的作用下不断扩散和飘移。此外,不同类型火山的喷发高度也各不相同,一次大规模的火山喷发所形成的火山灰云通常能够进入对流层和平流层,并长期飘浮在空中。

1.1.2 火山灰云危害

1. 对自然环境的危害

大量的火山灰云覆盖在地球上空,能够削弱到达地面的太阳辐射,引起臭氧层破坏、大气污染、温室效应、酸雨和气温、降水异常等全球气候和环境系统的重大变化,严重危害自然环境。火山灰云含有大量的 H_2O 、 SO_2 、 H_2S 、 CO_2 等气体成分。火山喷发初期,喷发出的大量热量不但引起火山口附近地区的地表温度升高,而且还引起降水出现异常; SO_2 与火山喷发出的水蒸气成分发生光化学反应,形成硫酸气溶胶;与此同时,火山灰云中的 SO_2 、 H_2S 和 HCl 等气体极易形成酸雨; HCl 气体能够与大气圈中的臭氧发生化学反应,导致大气圈中的臭氧总量减少,加剧了臭氧层空洞现象;持续性或大规模喷发的火山灰云中的 CO_2 能够显著地增加大气圈中的 CO_2 浓度,并引起地表温度升高,一定程度上增强了温室效应。此外,火山灰云还能够增加局部地区空气中的悬浮颗粒物浓度,在一定程度上引起大气污染(图 1.1)。例如,1980 年 5 月 18 日美国圣海伦斯(Mount St. Helens)火山突然大喷发,共释放了 2 400 万吨爆炸当量的热能(相当于“二战”中美国投放到日本广岛“小男孩”原子弹的 1 600 倍),火山灰冲入 24.4 km 高空,喷发出大量的火山灰碎屑颗粒曾在美国十多

个州区域内出现了沉降。火山喷发当天,附近区域的天空由蓝色瞬间变成可怕的灰黑色,引发当地局地气候和天气系统的巨大变化。

2. 对航空安全的危害

火山灰云在引起全球气候和环境系统重大变化的同时,由于其飘浮高度(一般处于平流层)恰好也是航空器飞行的高度,极易造成重大经济损失和人员伤亡。因此还严重危害航空运输安全。

火山灰云最主要成分是粒径小于 2 mm、质地坚硬且形状不规则的火山碎屑颗粒物。一方面,它不仅能够降低大气的能见度,而且还能腐蚀航空器发动机、着陆灯、操作面和挡风玻璃等机体(图 1.2),造成重大的经济损失,更为严重的是还会干扰无线通信系统,导致各种仪器失灵,威胁飞行安全,极易引发航空安全事故(案例一)。另一方面,当缺少足够的对火山灰云监测和预警手段时,出于安全考虑,通常采取大范围关闭机场、中断途经区域的空中交通等,一定程度上加剧了经济损失(案例二)。

1.1.3 问题的提出

全球火山分布广泛、类型众多,地质条件也并不完全一致。尽管火山分布位置已知,但是哪一座火山喷发、什么时间喷发、如何喷发等都是未知的。一方面,火山喷发具有突发性和极大的破坏性特征,其形成火山灰云的地点、强度、

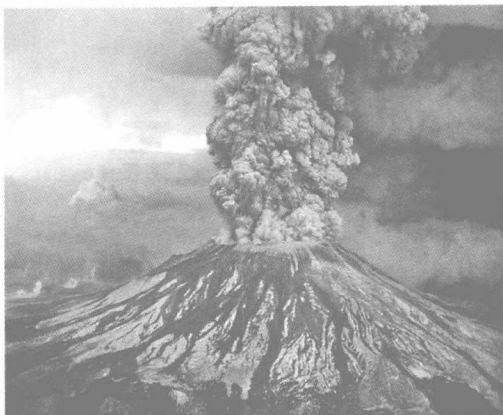


图 1.1 1980 年 5 月 18 日圣海伦斯火山爆发



图 1.2 遭遇火山灰云的飞机

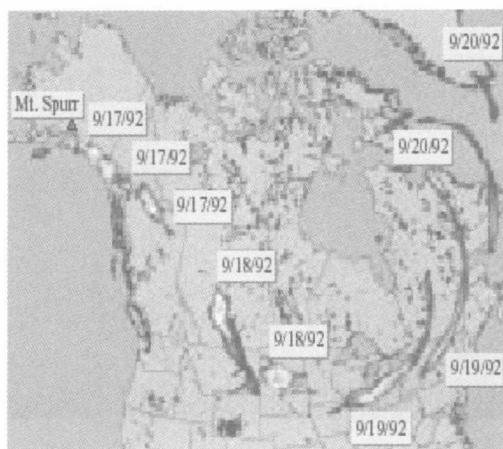


图 1.3 1992 年 Spurr 火山灰云扩散路径



图 1.4 东北亚地区火山与航线分布，
▲为火山，斜线之间部分为
民航途经区域

高度和影响范围都难以被准确地预测出来。另一方面，火山灰云在飘移的过程中受到风力、风速等的影响而不断发生变化，其扩散过程具有不确定性(图 1.3)。

在全球化背景下，国际航空运输日益繁荣，航空运输线路也日益增多。以东北亚地区为例(图 1.4)，大多数航空运输线都位于火山口上方，火山喷发对航空安全的影响不言而喻。影响火山喷发和火山灰云扩散的不确定性因素叠加在一起，一旦出现大型的火山喷发，就会极易威胁到正常的航空运输安全。

目前，如何对火山灰云进行有效的识别和实时监测，以及进一步预测其扩散轨迹，已成为摆在航空安全和火山领域科研工作者面前的重要任务之一。

§ 1.2 遥感概述

1.2.1 遥感基本概念

1. 遥感概念

遥感(remote sensing, RS),泛指一切无接触的远距离探测。大不列颠百科全书对遥感的定义为：不直接接触物体本身，从远处通过探测仪器接收来

自目标物体的信息(电场、磁场、电磁波、地震波),经过一定的数据传输和处理分析,识别目标物体的属性及其分布等特征的技术。目前,国内普遍采用的遥感定义为:遥感是在远离探测目标处,使用一定的空间运载工具和电子、光学仪器,接收并记录目标的电磁波特性,通过对电磁波特性进行传输、加工、分析和识别处理,揭示出物体的特征性质及其变化的综合性探测技术。

从定义来看,遥感有广义和狭义之分。

1) 广义的遥感

广义的遥感是指各种非直接接触、远距离探测目标的技术,往往是通过间接手段来获取目标状态信息。例如,遥感主要根据物体对电磁波的反射和辐射特性来对目标进行采集,包括利用声波、电磁场、外力波和地震波等。此外,自然界中的一些生物也都存在遥感现象,例如,响尾蛇、江豚、蝙蝠和人的眼睛、耳朵等。但是在实际工作中,只有电磁波探测属于遥感范畴。

2) 狭义的遥感

狭义的遥感是指利用安装在遥感平台上的可见光、红外、微波等各种传感器,通过摄影、扫描等方式,从高空或远距离甚至外层空间接收来自地球表层或地表以下一定深度各类地物发射或反射的电磁波信息,并对这些信息进行加工处理,进而识别出地表物体的性质和运动状态。

遥感技术的基础是电磁波,并由此判读和分析地物目标和现象。因此,从电磁波的角度来看,狭义的遥感还可以看作是一种利用物体反射或辐射电磁波的固有特性,通过研究电磁波特性,达到识别物体及其环境的技术。

2. 遥感类型

因为遥感技术应用领域广,涉及学科多,不同领域的研究人员所持立场不同,所以遥感的分类方法也不同。但总的来讲,主要有以下几种类型。

1) 根据遥感平台分类

遥感平台是指搭载传感器的工具,主要包括人造地球卫星、航天飞机、无线电遥控飞机、气球、地面观测站等。表 1.1 为常用的遥感平台及其高度和用途等。

表 1.1 常见的遥感平台

遥 感 平 台	高 度	用 途	例 子
静止轨道卫星	36 000 km	定点地球观测	气象卫星(FY-2、GMS等)
圆轨道(地球观测)卫星	500~1 000 km	定期地球观测	Landsat、SPOT、MOS等
航天飞机	240~350 km	不定期地球观测 空间实验	
超高度喷气飞机	10~12 km	侦查、大范围调查	
中低高度飞机	500~8 000 m	各种调查、航空摄影测量	
无线电遥控飞机	500 m 以下	各种调查、摄影测量	飞机、直升机
气球	800 m 以下	各种调查	
吊车	5~50 m	地面实况调查	
地面测量车	0~30 m	地面实况调查	车载升降台

根据传感器的运载工具和遥感平台的不同,遥感分为:

地面遥感: 将传感器设置在地面平台之上,常用的遥感平台有车载、船载、手提、固定和高架的活动平台等。地面遥感是遥感的基础阶段。

航空遥感: 将传感器设置在飞机、飞艇、气球上面,从空中对地面目标进行遥感。主要遥感平台包括飞机、气球等。航空遥感是航天遥感的进一步发展阶段。

航天遥感: 将传感器设置在人造地球卫星、宇宙飞船、航天飞机、空间站、火箭上面,从外层空间对地物目标进行遥感。航天遥感和航空遥感一起构成了目前遥感技术的主体。

航宇遥感: 将星际飞船作为传感器的运载工具,从外太空对地月系统之外的目标进行遥感探测。主要传感平台包括星际飞船等。

2) 根据传感器的探测波段分类

根据传感器所接收电磁波谱的不同,遥感分为:

紫外遥感: 探测波段在 $0.05 \sim 0.38 \mu\text{m}$ 之间,主要集中在探测目标地物的紫外辐射能量,目前对其研究较少。

可见光遥感：探测波段在 $0.38\sim0.76\ \mu\text{m}$ 之间，主要收集和记录目标地物反射的可见光辐射能量，常用的传感器主要有扫描仪、摄影机、摄像仪等。

红外遥感：探测波段在 $0.76\sim1\ 000\ \mu\text{m}$ 之间，主要收集和记录目标地物辐射和反射的红外辐射能量，常用的传感器有扫描仪、摄影机等。

微波遥感：探测波段在 $1\sim1\ 000\ \text{mm}$ 之间，主要收集和记录目标地物辐射和反射的微波能量，常用的传感器有扫描仪、雷达、高度计、微波辐射计等。

多波段遥感：探测波段在可见光波段和红外波段范围内，把目标地物辐射的电磁辐射细分为若干窄波段，同时得到一个目标物不同波段的多幅图像。常用的传感器有多光谱扫描仪、多光谱摄影机和反束光导管摄像仪等。

3) 按工作方式分类

根据传感器工作方式的不同，遥感分为：

主动遥感：传感器主动发射一定电磁能量并接受目标地物的后向散射信号的遥感方式，常用传感器包括侧视雷达、微波散射计、雷达高度计、激光雷达等。

被动遥感：指传感器不向目标地物发射电磁波，仅被动接受目标地物自身辐射和对自然辐射源的反射能量，因此被动遥感也被称为他动遥感、无源遥感。

4) 按数据的显示形式分类

根据数据显示形式的不同，遥感分为：

成像遥感：指传感器接收的目标电磁辐射信号可以转换为图像，电磁波能量分布以图像色调深浅来表示，主要包括数字图像和模拟图像两种类型。

非成像遥感：指传感器接收的目标地物电磁辐射信号不能转换成为图像，最后获取的资料为数据或曲线图，主要包括光谱辐射计、散射计和高度计等。

5) 按波段宽度和波谱连续性划分

按成像波段宽度以及波谱的连续性，遥感分为：

高光谱遥感：利用很多狭窄的电磁波波段（波段宽度通常小于 $10\ \text{nm}$ ）产生光谱连续的图像数据。

常规遥感：又称宽波段遥感，波段宽度一般大于 $100\ \text{nm}$ ，且波段在波谱上