

文章编号: 1672-8785(2014)11-0001-04

# 基于卫星图像的火山灰云识别方法研究

李成范 尹京苑 赵俊娟 董江山

(上海大学计算机工程与科学学院, 上海 200444)

**摘 要:** 大规模的火山灰云既会引起全球气候和环境系统的巨大变化, 又会威胁航空安全。卫星遥感技术能够快速准确地获取大范围的空间变化信息, 实现对火山灰云发生、扩散状况的识别和预警。首先阐述了火山灰云的光谱特征和常用的卫星图像类型; 然后从紫外吸收法、模式识别法、分裂窗量温差和改进型分裂窗量温差算法方面系统地介绍了火山灰云的识别方法; 最后对国内现有的基于卫星图像的火山灰云的研究进行了评述, 并对其发展趋势进行了总结和讨论。

**关键词:** 卫星图像; 遥感传感器; 火山灰云; 识别方法

**中图分类号:** TP753 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.11.001

## Study of Identification Method of Volcanic Ash Cloud Based on Satellite Image

LI Cheng-fan, YIN Jing-yuan, ZHAO Jun-juan, DONG Jiang-shan

(School of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** Large-scale volcanic ash cloud could not only cause great changes in the global climate and environmental system, but also form a threat to aviation safety. Satellite remote sensing can quickly and accurately acquire the space change information in a large range. So it can implement the identification and early-warning of appearance and diffusion of volcanic ash cloud. Firstly, the spectral characteristics of volcanic ash cloud and the types of common satellite images are described. Then, the identification methods of volcanic ash cloud are presented systematically in the aspects of ultraviolet absorption, pattern recognition, split-window temperature difference and improved split-window temperature difference algorithms. Finally, the current study of volcanic ash cloud based on satellite images in China is reviewed and its trend is summarized and discussed.

**Key words:** satellite image; remote sensor; volcanic ash cloud; identification method

## 0 引言

火山喷发物主要包括火山碎屑和气体, 其中火山碎屑较多, 分布也较广泛。一次大型的火山喷发往往会产生大量的火山碎屑和气体, 二者混合会形成大量火山灰云。在喷发动力的作

用下, 火山灰云能直接冲破大气对流层而进入平流层, 形成的火山灰云由于不易扩散而长期停留在高空。这样的直接后果就是引发大气污染、酸雨和降水异常等气候与环境变化。与此同时, 火山喷发出的碎屑颗粒物在高温作用下会

**收稿日期:** 2014-10-09

**基金项目:** 国家自然科学基金(41404024), 上海市科技发展基金(14231202600), 上海高校青年教师培养资助计划(2014-2016), 上海市高等教育内涵建设085工程

**作者简介:** 李成范(1981-), 男, 河南南阳人, 博士, 工程师, 主要从事热红外卫星遥感信息处理及应用研究。

E-mail: lchf@shu.edu.cn

粘附在航空发动机叶片上<sup>[1,2]</sup>, 因此火山灰云极易引发航空事故。

卫星遥感技术具有覆盖范围广、信息量大、精度高和快速及时的特点。它已引起各国火山领域专家的关注和兴趣。自 20 世纪 80 年代起, 国外已开始尝试利用卫星图像对一些大规模的火山灰云进行研究<sup>[3-5]</sup>。近年来, 随着我国大量国际航线的开辟, 我国民航客机遭遇火山灰云威胁的可能性逐渐增大。在此背景下, 我国国内相关领域的学者也开始利用卫星图像对火山灰云进行研究。本研究从火山灰云的遥感特征和方法出发, 对利用卫星图像识别火山灰云的研究现状和方法进行分析和总结, 并对其发展趋势进行总结和讨论。

## 1 火山灰云的光谱特征和常用的卫星图像

### 1.1 光谱特征

传统的火山灰云识别主要依靠地面站点观测和飞机航拍实现, 局限性明显。卫星遥感技术恰好能够弥补传统识别方法的不足, 可以快速、准确获取大范围的火山灰云信息。其理论基础就是通过传感器捕捉火山灰云在不同波段范围内的反射光谱特征(图 1)。

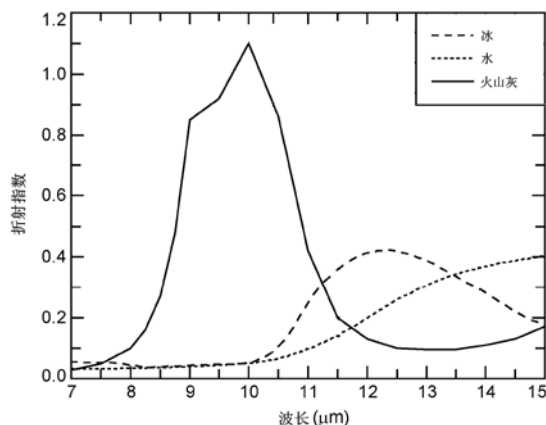


图 1 火山灰云主要矿物成分的光谱反射特征

图 1 中, 在热红外波段的 10~12  $\mu\text{m}$  范围内, 火山灰云中的碎屑颗粒物的光谱吸收能力随着波长的增加而迅速减小, 而其他地区的冰和水等的光谱吸收特征恰好相反。这正是基于热红

外波段的分裂窗量温差算法的理论基础。但在一些复杂的如陆地、沙漠等复杂地表和有卷积云、高云等云量等环境和气象条件下, 火山灰云并不能被很好地从其他地物和周围环境中识别出来。这就意味着除了火山灰云的热红外光谱吸收特征之外, 还需要参考其他一些特征来进行识别研究。

### 1.2 卫星图像

目前, 在利用卫星图像进行火山灰云监测的领域中, 常用的卫星传感器有甚高分辨率辐射计 (advanced very high resolution radiometer, AVHRR)、中分辨率成像光谱仪 (moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)、臭氧总量制图光谱仪 (total ozone mapping spectrometer, TOMS)、全球臭氧监测实验仪 (global ozone monitoring experiment, GOME)、我国的风云三号 (FY-3A) 和环境与灾害监测预报小卫星 (HJ-1) 上携带的传感器等。

作为 AVHRR 传感器的升级替代产品, MODIS 传感器搭载在 1999 年 12 月 18 日发射升空的 Terra/aqua 卫星上。它具有 36 个离散光谱波段, 光谱覆盖了从可见光到热红外 (0.4  $\mu\text{m}$ ~1.44  $\mu\text{m}$ ) 的范围。目前, MODIS 传感器是火山灰云监测研究中最常用的传感器之一。国产的 FY-3A 卫星上携带有多个传感器, 其中火山灰云识别中用到的主要是可见光红外扫描辐射计 (visible and infrared radiometer, VIRR) 和中分辨率光谱成像仪 (medium resolution spectral imager, MERSI) 传感器, 它们能够准确获取火山碎屑颗粒物在短波红外和热红外波段范围内的光谱吸收特征。上述几类卫星传感器都具有较强的火山灰云监测潜力。

## 2 基于卫星图像的火山灰云识别方法

通过对国内外众多火山灰云案例进行研究和综述, 将目前出现的基于卫星图像的火山灰云识别方法归纳为以下几类:

### 2.1 紫外吸收法

紫外吸收法是最早出现的利用卫星图像进行火山灰云识别的方法之一。其原理是  $\text{SO}_2$  气体和火山灰碎屑在紫外波段范围内具有显著的

吸收特征, 因此该方法被称为紫外吸收法。在初期, 紫外吸收法取得了较好的效果, 但是能够被用来识别火山灰云的卫星传感器的类型单一, 数量较少。目前仅有 TOMS 传感器的光谱范围包含该波段, 由于 TOMS 的空间分辨率大 (经纬度为  $1^\circ$ , 约为  $2500 \text{ km}^2$ ) 且时间分辨率较长 (约为 1 天), 局限性非常明显<sup>[6]</sup>。紫外吸收法大多情况下被选为火山灰云识别研究中的一种参考方法。

## 2.2 模式识别法

无论何种类型的火山, 其喷发出的气体中绝大多数是水蒸气 ( $\text{H}_2\text{O}$ )。这恰恰也是普通云团的主要成分。模式识别法的原理基础是, 在可见光波段范围内, 火山灰云的反射光谱特征要比普通云团弱。通过参考风速、气压等气象因素及地形地貌等地理因素能够将火山灰云识别出来, 然后根据假彩色合成技术和设定阈值的方式实现火山灰云的彩色显示。尽管模式识别法的处理速度快、效率高, 但是该方法受火山喷发持续时间和火山灰云团形态变化的影响较大<sup>[7,8]</sup>。例如, 在火山灰云形成之初, 该方法的识别精度较高, 但随着火山灰云的扩散, 识别精度逐渐降低。此外, 该方法中火山灰云与普通云团的区分具有很大的主观性, 目前还没有统一的区分标准。

## 2.3 分裂窗亮温差算法

分裂窗亮温差算法是指利用火山灰云在热红外波段范围内的吸收光谱特征, 通过对比火山灰云的亮温与背景场的亮温差来识别火山灰云, 如图 2 所示。由于该方法操作简单、易于实现, 能够快速识别火山灰云, 因此应用广泛<sup>[9,10]</sup>。但当遇到复杂地形和天气条件时 (火山灰云与普通云团和冰雪地表严重混淆), 其识别效果就会很差。尽管如此, 分裂窗亮温差算法逐渐受到广大研究人员的关注和青睐, 已成为目前应用最广泛的火山灰云识别方法之一。

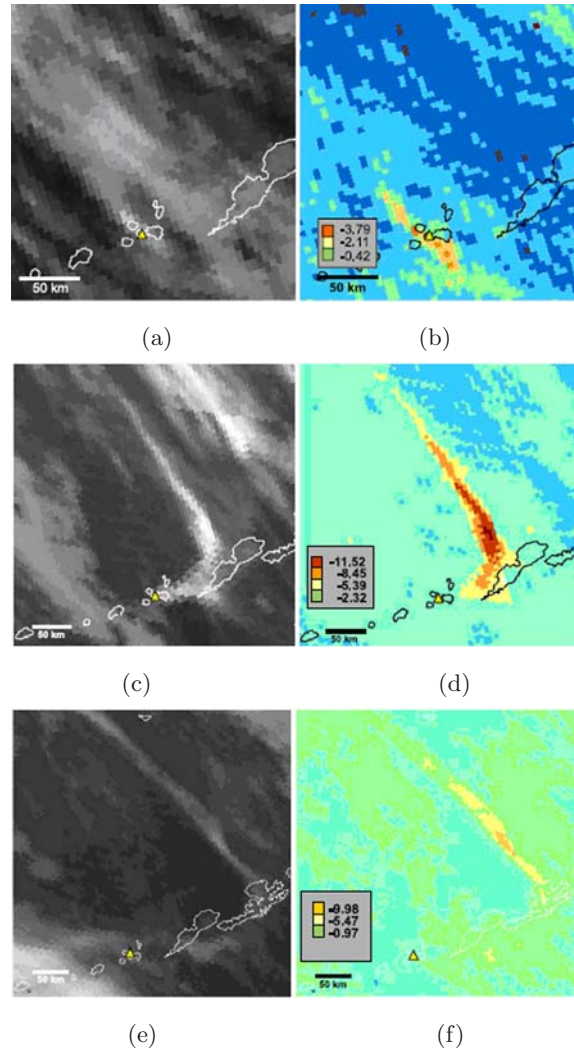


图 2 2001 年 2 月 19 日克利夫兰火山灰云的 GOES 卫星图像, (a)、(c)、(e) 分别为早、中、晚期的原始图像, (b)、(d)、(f) 分别为早、中、晚期的分裂窗亮温差算法结果<sup>[3]</sup>

## 2.4 改进型分裂窗亮温差算法

在分裂窗量温差算法的基础上, 根据云层类型、分布以及地形地貌等一些复杂情况, 研究人员提出了针对性较强的改进型分裂窗量温差算法。例如, 通过在分裂窗亮温差算法的基础上增加分割条件来细化识别规则<sup>[2]</sup> 或对识别出的火山灰云结果进行修正<sup>[11]</sup> 等来提高火山灰云识别精度, 并对多源遥感数据和地面验证数据<sup>[12,13]</sup> 进行验证。此外, 还出现了针对卫星图像特征进行处理的方法, 例如, 引入主成分分析 (principal component analysis, PCA) 和独立分量分析 (independent component analysis, ICA) 等<sup>[14]</sup> 方法对卫

星图像进行预处理,以提高火山灰云的识别精度。但是一般而言,这些改进型分裂窗亮温差算法都存在一些弊端,如增大了计算难度和复杂度,存在主观性和不确定性,这就使得改进型分裂窗量温差算法难以大范围推广并形成实用化业务。

### 3 国内现有研究基础和发展趋势

与国外相比,我国利用卫星图像进行火山灰云识别的研究还处于探索阶段,成果也较少。近年来,我国自主研制、生产和发射升空的遥感器日益增多,越来越多的航班不断穿越火山喷发区域,我们迫切需要利用国外或国产卫星图像为飞机提供火山喷发的识别和预警信息。当前,我国相关科研人员正在奋起直追,不断缩小与国外科研的差距。赵谊 2003 年指出利用卫星遥感技术可以将火山灰云与气象云分开<sup>[15]</sup>。朱琳<sup>[12]</sup>等 2011 年提出了基于复杂气象条件下的短波红外-热红外方法的火山灰云监测方法。尹京苑<sup>[16]</sup>和李成范<sup>[17]</sup>等根据 MODIS 热红外遥感数据的特点,利用 PCA 和 ICA 等方法对 MODIS 热红外数据进行处理,降低了卫星图像中不同热红外波段之间的相关性和数据冗余,并以 2010 年 4 月冰岛埃亚菲亚德拉冰盖火山灰云为例进行了验证。目前,本团队正在尝试利用国产 FY 系列卫星遥感器进行火山灰云识别的方法研究,期望为将来我国利用国产卫星传感器进行有关火山灰云监测和预警发布提供参考和建议。

基于卫星图像的火山灰云识别研究的发展趋势主要体现在以下四个方面:

(1) 识别算法不断增多,监测精度逐渐增高。例如,识别算法已由最初的紫外光吸收法发展到目前广泛使用的基于热红外卫星遥感图像的分裂窗亮温差算法和一些有针对性的改进算法等。识别精度也由最初的几百千米提高到数千千米。

(2) 利用多个火山灰云遥感监测特征进行综合识别。火山灰云在卫星图像上具有不同的遥感监测特征如火山光谱特征、温度、水分含量、SO<sub>2</sub> 含量以及周围背景特征等。在实际应用中,往往需要综合利用多个遥感监测特征来综合识别火山灰云。

(3) 从火山灰云的识别逐渐发展到火山灰云的扩散追踪和预测。一般而言,火山灰云扩散追踪和预测研究主要依靠数学模型实现。卫星遥感技术能够准确识别出火山灰云的出现、扩散和漂移。如何基于已有的数学模型,根据火山灰云的物理和化学性质、风力和地形等辅助因素,并结合多幅卫星影像的变化信息分析,实现火山灰云的扩散路径追踪和预测,是下一步研究的方向。

(4) 火山灰云的自动化、智能化识别。随着卫星遥感器类型的增多,性能的提升,识别算法的改进、完善以及计算机软件和通信技术的发展,基于卫星图像的火山灰云识别逐渐向自动化、智能化方向发展。

### 4 结论

卫星遥感技术被引入火山领域已有 30 多年的历史,其应用已由最初的火山活动监测扩展到火山灰云的识别、扩散路径监测和预警等方面。基于我国特有的地理位置和现实国情,国内研究人员对该领域的关注一直较少,且各研究单位之间和相近研究领域之间并没有形成统一的交流机制与信息共享平台,没有国外现阶段火山灰云遥感监测水平的科研成果,与国外的差距较明显。但庆幸的是,在 2010 年冰岛艾雅法拉火山喷发事件的影响下,国内一批研究人员已经开始利用卫星遥感技术进行火山灰云的识别、扩散路径追踪和预警研究。因此,当前只有在参考国外相对成熟技术的基础上,不断夯实现有的研究基础,积极举办相关研讨会,并争取参与到国际航线火山灰监测的有关项目中,才能迅速追赶上国外的先进水平。

### 参考文献

- [1] 马志刚. 浅析火山灰通告[J]. 空中交通管理, 2000(1): 37-38.
- [2] 李成范, 尹京苑, 董江山, 等. 基于热红外卫星遥感的火山灰云监测研究[J]. 红外技术, 2013, 35(8): 487-491.
- [3] Kenneson G D, Jonathan D, Kenneth RP, et al. Integrated Satellite Observations of the 2001 Eruption of Mt. Cleveland, Alaska[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 135(1): 51-73.

(下转第 14 页)