

基于热红外卫星遥感的火山灰云监测研究

李成范, 尹京苑, 董江山, 沈迪

(上海大学计算机工程与科学学院, 上海 200444)

摘要: 热红外卫星遥感技术能够准确地进行火山灰云监测。针对火山灰云热红外卫星遥感图像, 通过利用主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 方法解决了热红外卫星遥感数据具有波段相关性和数据冗余问题, 并提高了火山灰云的监测精度。以 MODIS 热红外卫星遥感图像为例, 利用 PCA 方法对火山灰云进行监测研究, 并采用 USGS 标准光谱数据库对监测出的火山灰云光谱特征进行验证。结果表明: PCA 方法能够有效地提取出火山灰云信息, 且得到的火山灰光谱特征与 USGS 标准光谱数据库的光谱匹配度达到了 81.65%, 具有较高的精度。

关键词: 热红外卫星遥感; MODIS 图像; 主成分分析; 火山灰云监测

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2013)08-0487-05

Monitoring of Volcanic Ash Cloud Based on Thermal Infrared Satellite Remote Sensing

LI Cheng-fan, YIN Jing-yuan, DONG Jiang-shan, SHEN Di

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

Abstract: The thermal infrared satellite remote sensing technology can be used to accurately monitor the volcanic ash cloud. Aiming at the thermal infrared satellite remote sensing image of the volcanic ash cloud, the principal component analysis (PCA) is able to solve the inter-band correlation and data redundancy of the thermal infrared satellite remote sensing data, and improve the monitoring accuracy of volcanic ash cloud. Taking the MODIS thermal infrared satellite remote sensing image for example, this paper monitors the volcanic ash cloud by PCA method, and verifies the spectral characteristics of monitored volcanic ash cloud information by the United States Geological Survey (USGS) standard spectral database. The results show that: PCA method can obtain effectively the volcanic ash cloud information from the MODIS thermal infrared satellite remote sensing image; compared to the USGS standard spectral database, the spectral match of the monitored volcanic ash cloud spectral characteristics reaches 81.65%, and the precision degree is pretty high.

Key words: thermal infrared satellite remote sensing, MODIS image, principal component analysis (PCA), volcanic ash cloud monitoring

0 引言

火山灰云主要是由火山灰碎屑颗粒物和 H_2O 、 SO_2 、 H_2S 、 CO_2 等气体构成, 当这些成分混合充分时, 就容易形成酸性气溶胶。不但能够削弱到达地面的太阳辐射, 引起臭氧层破坏、大气污染和气温异常等全球气候和环境系统问题^[1], 而且还容易损坏机体、腐蚀发动机导致熄火, 引起机毁人亡^[2-5]。热红外卫星遥感技术具有空间覆盖范围广和时间分

辨率高的特点^[6-7], 能够实时、准确地获取火山灰云的海量信息, 可以作为火山灰云监测的一个重要工具。目前, 国外广泛采用地球静止环境卫星 (GOES) 的成像仪和垂直探测仪及 NOAA 卫星搭载的甚高分辨率辐射计 (AVHRR) 进行火山灰云监测。Hillger 和 Ellrod 等利用 GOES 热红外卫星遥感数据对火山灰云中的碎屑颗粒、卓火电和烟尘等进行了监测研究, 表明利用热红外卫星技术进行低层大气和地表的颗粒物、灰尘监测是可行的^[8]。Webley 和 Mastin

收稿日期: 2013-04-12; 修订日期: 2013-06-13.

作者简介: 李成范 (1981-), 男, 博士, 工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为遥感与空间信息处理。E-mail: lchf@shu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 41172303。

通过对传统的热红外卫星遥感监测火山灰云案例进行总结和分析,提出针对火山灰云扩散模型中的灰云柱高度、喷发率、经纬度等进行改进的方法和建议^[2]。而对于分辨率较高的 MODIS 卫星遥感传感器,其在火山灰云监测领域中的研究则很少涉及。在国内,由于我国并不是火山喷发的高危区域,以前对这方面的研究几乎是一片空白^[9]。但是随着近年我国经济的快速发展,国际航线的大量开辟,使得遭遇这类灾害的可能性逐渐增大,甚至能够威胁到我国本土的安全。

然而,受制于热红外卫星遥感传感器的成像机理,所获取的火山灰云遥感数据通常存在波段相关性和数据冗余问题。传统的火山灰云监测研究则很少考虑到遥感数据自身特点,这在一定程度上限制了火山灰云的监测精度。目前,进行火山灰云监测常用的方法主要有紫外吸收法、分裂窗亮温差方法和多波段法等^[9-10],但是这些方法大都存在精度低、适用范围窄的局限性,而主成分分析(Principal component analysis, PCA)方法的核心是降维,旨在通过消除多维数据波段相关性和数据冗余,在信号处理、数据压缩、特征提取和模式识别领域具有广泛应用^[11]。虽然 PCA 具有巨大的应用潜力,但是其在火山灰云监测中的研究相对较少,成果也较少。鉴于此,本文以 2010 年 4 月 19 日获取的冰岛艾雅法拉(Eyjafjallajökull)火山灰云的 MODIS 图像为数据源,利用 PCA 方法进行火山灰云监测研究,以期为其他火山灰云监测提供借鉴。

1 基本原理

以含有 N 个波段的原始遥感图像为例,主成分图像(principal component images, PCIs)与原始遥感图像之间具有如下关系:

$$PCI = E \cdot B = E \cdot \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \cdots \\ B_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: E 为 $M \times N$ 转换矩阵; B 为原始遥感图像的波段数,每一行矢量表示一个波段的图像。

矩阵 B 的协方差矩阵 S 为:

$$S = \frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m (B(t) - B)(B(t) - B)^T \quad (2)$$

式中: $B = (B_1, B_2, \cdots, B_n)^T$, B_i 为第 i 波段的平均值,

$$B_i = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m b_{it}。$$

求解特征方程 $(\lambda I - S)E = 0$, 将特征值 λ 按照从小到大的顺序排列,求出对应特征值的单位特征向量 e_i , 以 e_i 的列构成矩阵 E' , E' 矩阵的转置矩阵 E 即为所求的转换矩阵。PCI 与原始波段的转换关系为:

$$\begin{cases} PCI\ 1 = e_1 B = e_{11} B_1 + e_{12} B_2 + \cdots + e_{1n} B_n \\ PCI\ 2 = e_2 B = e_{21} B_1 + e_{22} B_2 + \cdots + e_{2n} B_n \\ \cdots \cdots \cdots \\ PCI\ n = e_n B = e_{n1} B_1 + e_{n2} B_2 + \cdots + e_{nn} B_n \end{cases} \quad (3)$$

PCI 与原始光谱波段图像包含相同的信息。PCI 1 图像信息量最大,随后信息量依次降低。

2 2010 年冰岛艾雅法拉火山灰云监测

2.1 研究区概况

有着“极圈火岛”美誉之城的冰岛,虽然面积仅为 103000 km²,但是岛内冰川和火山众多。其中,位于首都雷克雅未克东南部的艾雅法拉火山在 2010 年 3 月 20 日晚开始喷发。随后,在 2010 年 4 月 14 日再次剧烈喷发。后一次喷发的强度和规模要远大于前一次,并形成了巨大的火山灰云团。如图 1 所示,在高空风力的作用下,火山灰云快速扩散到欧洲大陆和北大西洋上空。据相关统计数据显示,此次火山灰云灾害造成欧洲大多数机场关闭,1000 多个航班被取消,几乎整个空中交通瘫痪,直接经济损失就达上千亿欧元。

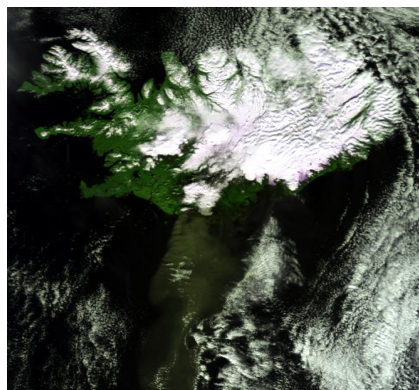


图 1 冰岛艾雅法拉火山灰云的 MODIS 假彩色合成图像
Fig.1 The MODIS false color image of Eyjafjallajökull volcanic ash cloud

2.2 艾雅法拉火山灰云监测

MODIS 传感器搭载在美国 Terra/aqua 卫星上,于 1999 年 12 月 18 日发射升空。MODIS 传感器共有 36 个离散光谱波段,其中 20~25 光谱波段为中

波热红外波段，26 光谱波段为近红外波段，27~36 光谱波段为长波热红外波段，空间分辨率分别为 250 m、500 m 和 1000 m，最大扫描宽度为 2330 km。

为了验证 MODIS 数据中 20~36 光谱波段（26 波段除外）对火山灰云的敏感性，本文采用 PCA 方法对 MODIS 数据进行处理。在获取的 PCI 图像中，仅有 PCI 1、2、3、4 中噪声信息较少，如图 2 所示，基本上能够满足监测火山灰云信息的需要。而在其余的 PCI 图像中，噪声信息较大或者基本上都是噪声信息，在实际的火山灰云监测研究中，通常可以忽略不计。

从图 2 中可知，在 PCI 1、2、3、4 图像中，虽然绝大多数都是云和海水信息，但是火山灰云信息仍被识别出来，这表明 PCI 1、2、3、4 图像含有有效监测出火山灰云的信息量。对于气象云来说，云层越高，颜色越白。这是因为云层越高，其在热红外波段范围内的亮度温度较低，颜色就越白；反之，当云层较低时，由于吸收大量的地面辐射热量，其

在热红外波段范围内亮度温度越高，颜色也就越深。对于地表而言，地表亮度温度逐渐从浅灰色到黑色变化，其中浅灰色表明亮度温度较低，黑色表明亮度温度较高，其他颜色则表示亮度温度逐渐发生变化。

另外，对于获取的 PCI 图像，分别从图像背景和图像特征因素（云量、陆地表面）判断火山灰云识别效果。其中，在 PCI 3 图像中，火山灰云与气象云和地表类型对比最明显，其次是 PCI 1 和 4 图像，PCI 2 图像中的对比效果最差，但是基本上还是能够监测出火山灰云的分布状况，而其余 PCI 图像则由于噪声信息太大而无法监测出火山灰云。为了能够定量分析监测出的火山灰云 PCI 1、2、3、4 图像效果，本研究中引入可释方差和信噪比（signal to noise ratio, SNR）参数，分别计算不同火山灰云 PCI 图像下的可释方差和信噪比，并按照火山灰云信息量递减的原则进行排列，结果如表 1 所示。

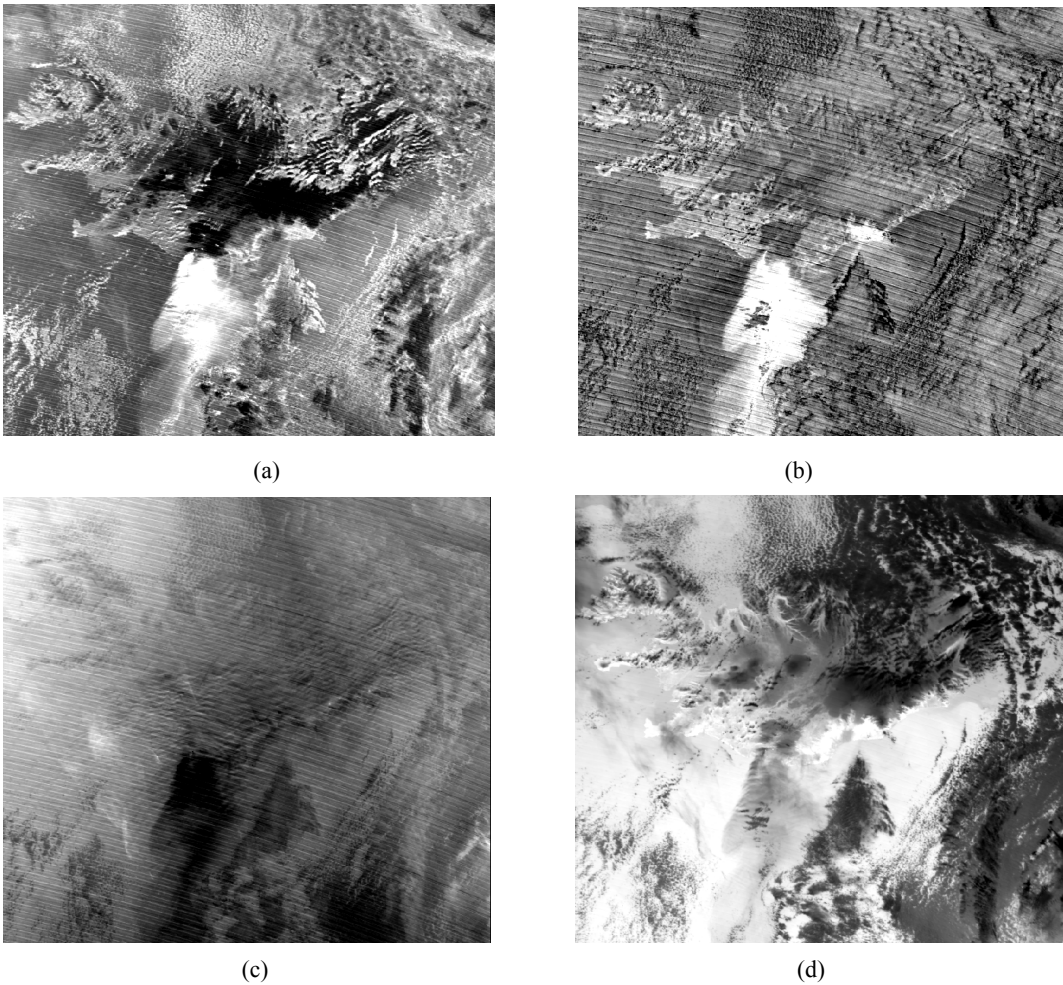


图 2 MODIS 数据的 PCI 图像，(a)、(b)、(c)、(d)分别为 PCI 1、2、3、4 图像
Fig.2 The PCI images of MODIS data, (a), (b), (c), (d) is the PCI 1, 2, 3, 4, respectively

从表 1 中看出, PCI 3 图像中火山灰云呈现出明显的亮色调, 与图像背景和其他特征对比最为明显, 识别效果也最好; 其次是 PCI 4 图像, 火山灰云与图像背景和其他特征的对比效果有所下降, 但是仍能够清楚的识别出火山灰云; PCI 1 图像中, 火山灰云呈现出暗色调, 云层为亮色调, 陆地为颜色更深的暗色调; PCI 2 图像中, 火山灰云呈现出暗色调, 其他特征基本上都为浅色调。此外, 从可释方差和信噪比来看, 火山灰云对比效果最好的 PCI 3 图像的可释方差和信噪比分别为 0.13 和 1.66, 火山灰云对比效果最不明显的 PCI 2 图像的可释方差和信噪比分别为 0.011 和 1.58。由此可见, 并不是可释方差和信噪比的值越大, 火山灰云对比效果就越好。

表 1 PCI 图像对比
Table 1 The comparison of PCI images

PCI 波段号	火山灰云 对比效果	可释方差 /%	SNR /dB
1	信号好	0.13	1.66
2	信号好, 有云噪声	0.20	1.33
3	信号好, 有噪声	0.008	4.55
4	对比不明显, 浓密的灰云	0.011	1.58

为了定量分析 MODIS 数据不同波段与 PCI 图像之间的关系, 本研究中利用 MODIS 波段对 PCI 图像的贡献来对不同的波段数据进行评价, 结果如表 2 所示。对于 PCI 3 而言, 波段 30 的贡献率最大, 其次是 36 波段; 对于 PCI 1, 贡献率最大的 36 波段, 其次是 25 波段; 对于 PCI 4, 贡献率最大的分别为波段 31 和 32, 其他波段的贡献率则相对较小; 对于 PCI 2, 贡献率最大的分别为波段 29 和 32。综合来看, 对于 PCI 1、2、3、4 图像, 贡献最大的波段分别为 36, 总贡献率分别达到了 72%, 其次是波

段 31 和 30, 也分别达到了 67%和 65%。

表 2 MODIS 波段对 PCI 图像的贡献(%)
Table 2 The contribution of MODIS bands data to
PCI images(%)

波段号	20	25	29	30	31	32	33	34	36
1	2	9	0	52	0	0	1	1	17
2	3	13	3	10	2	0	2	5	55
3	1	0	6	0	64	11	1	0	0
4	0	0	32	3	1	26	0	0	0
总计	6	22	41	65	67	37	4	6	72

通过分析可知, MODIS 数据中的波段 36、31 和 30 对火山灰云 PCI 图像的贡献最大。接下来, 我们以 MODIS 数据的 36、31 和 30 波段为数据源, 根据三波段主成分分析方法, 分别进行火山灰云监测。火山灰云信息监测结果如图 3 所示。

在各个 PCI 图像中, 将火山灰云与图像背景和其他特征因素区分最为明显的是 PCI 2 (图 3(b))。该图中火山灰云呈现出灰白色, 边缘清晰可见, 火山灰云纹理比较均匀, 与周围呈现出白色且纹理混乱的散碎云层对比明显, 较好的突出了火山灰云的纹理和光谱特性。

2.3 火山灰云监测结果

为了消除火山灰云中的噪声信息, 经过多次试验, 本研究最终决定采用拉普拉斯算子对获取的 PCI 图像进行 3×3 滤波处理 (图 4)。结果表明, 当采用拉普拉斯算子对 PCI 图像进行滤波处理时, 能够有效的消除噪声信息, 保证取得较好的火山灰云目视效果。从图 4 中看出, 利用 PCA 方法不但较好的实现了火山灰云信息的监测, 而且识别出的火山灰云信息与图像背景和其他地物特征对比明显。

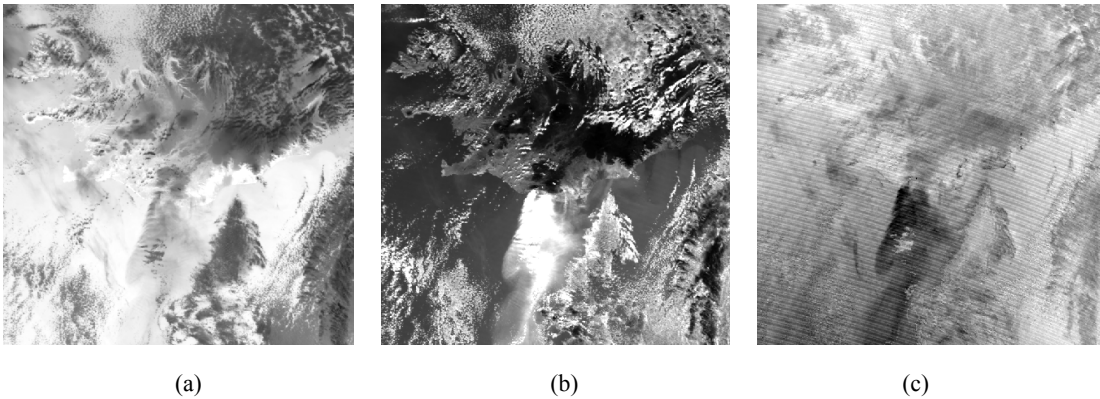


图 3 PCI 图像, (a)、(b)、(c)分别为 PCI 1、2、3 图像 Fig.3 The PCI images, (a), (b), (c) is the PCI 1, 2, 3, respectively



图 4 火山灰云信息

Fig.4 The volcanic ash cloud information

3 火山灰云监测结果分析

为了验证 PCA 方法监测火山灰云的效果,本研究中采用 USGS 标准光谱数据库中的矿物光谱信息来验证。根据 MODIS 数据各波段的波长区间,将 USGS 标准光谱数据库中的反射率数据重采样至 MODIS 数据相对应的波段区间,并建立其在 MODIS 数据中的光谱曲线。通过将大气校正后的光谱曲线与重采样后的火山灰矿物标准光谱库进行相似性匹配(图 5)。结果表明,火山灰的光谱曲线与光谱库中的火山灰的匹配程度达到 81.65%,取得了较好的效果。

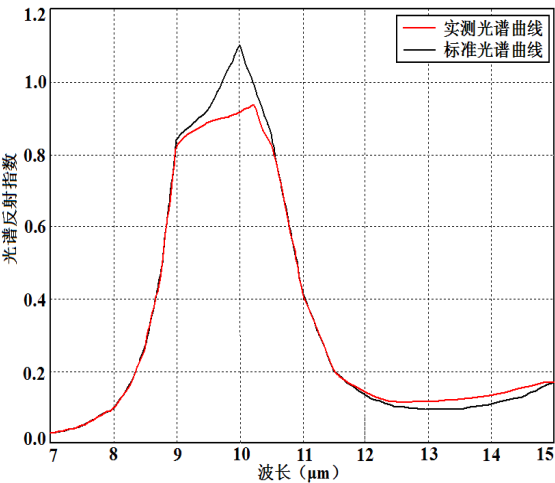


图 5 光谱曲线匹配结果

Fig.5 The result of spectral curve matching of volcanic ash cloud

4 结论

PCA 方法能够降低遥感数据不同波段之间的相关性和冗余性,通过分离出不同的地物特征信息,有利于提高火山灰云监测精度,且获取的火山灰云

信息也更加贴近真实分布情况,在火山活动性监测中具有广泛的应用。本研究以 2010 年 4 月 19 日的冰岛 Eyjafjallajökull 火山灰云为例,利用 PCA 方法从 MODIS 遥感图像中进行火山灰云监测,取得了较好的效果。虽然 PCA 方法在火山活动性监测领域中具有巨大的优势,但是由于不同类型的火山喷发所形成的火山灰云成分也并不完全相同,引起的吸收光谱特征也并不一致,因此,在利用 PCA 进行火山灰云监测时,需要根据研究区和火山灰云的实际情况,分别采用与之相适应的遥感数据和处理方法,而这方面的研究很少,这也是我们下一步的研究重点。

参考文献:

[1] Luke P F, Andrew J L H, Robert W. Improved identification of volcanic features using Landsat 7 ETM+ [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **78**(1-2): 180-193.

[2] Webley P, Mastin L. Improved prediction and tracking of volcanic ash clouds[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2009, **186**(1-2): 1-9.

[3] 李继华. 火山灰对航空飞行的危害及咨询服务[J]. *空中交通管理*, 2002(6): 41-42.

[4] Gangale G, Prata A J, Clarisse L. The infrared spectral signature of volcanic ash determined from high-spectral resolution satellite measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(2): 414-425.

[5] McCarthy E B, Bluth G J S, Watson I M, et al. Detection and analysis of the volcanic clouds associated with the 18 and 28 August 2000 eruption of Miyakejima volcano, Japan [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29**(22): 6597-6620.

[6] 蔡晓春, 胡以华, 陶小红, 等. 基于自适应检测算法的 ASTER 遥感图像机场检测[J]. *红外技术*, 2007, **29**(8): 443-446.

[7] 罗军, 杨卫平, 沈振康. 红外图像中机场跑道的自动目标识别[J]. *红外技术*, 2003, **25**(3): 13-17.

[8] Hillger D W, Ellrod GP . Detection of important atmospheric and surface features by employing principal component image transformation of GOES imagery[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, **42**(5): 611-629.

[9] 朱琳, 刘健, 刘诚, 等. 复杂气象条件下火山灰云遥感监测新方法[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, **41**(7): 1029-1036.

[10] 尹京苑, 沈迪, 李成范. 卫星遥感技术在火山灰云监测中的应用[J]. *地震地质*, 2013, **35**(2): 245-262.

[11] 郭云开, 董胜光, 彭悦. 基于Curvelet变换和PCA相结合的方法提取地质构造信息[J]. *测绘通报*, 2010(4): 15-18.