

2002 ~ 2005 年长白山火山气体的释放特征与地球化学异常研究——多源高光谱遥感证据^{*}

孙玉涛^{1,2} 郭正府^{1**} 成智慧^{1,2} 张茂亮¹ 张丽红¹

SUN YuTao^{1,2}, GUO ZhengFu^{1**}, CHENG ZhiHui^{1,2}, ZHANG MaoLiang¹ and ZHANG LiHong¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院大学, 北京 100049

1. Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2016-04-30 收稿, 2016-08-01 改回.

Sun YT, Guo ZF, Cheng ZH, Zhang ML and Zhang LH. 2017. Gaseous anomalies related to the activities of Changbai Volcano in 2002 ~ 2005: Evidence from multi-sensor hyperspatial satellite archived data. *Acta Petrologica Sinica*, 33(1): 221 – 230

Abstract The Changbai Volcano is a volcanic area of potentially eruption dangerous in China. Enhanced volcanic activities and magma chamber disturbances occurred in 2002 ~ 2005. The remote sensing observation technology has the spatial and temporal advantages, which might be used in the volcanic monitoring and research. Thus the anomalies of CO total column (TotCO), total O₃ (TotO₃), total H₂O (TotH₂O) and surface skin temperature (SKT) in the Changbai Volcano during the period from 2002 to 2005 were extracted from the archived data of Measurement of Pollution In The Troposphere (MOPITT) and Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) hyperspectral satellite data. The results indicated it is well consistent of the multi-hyperspectral satellite data and the fluid observation in the field. Significant anomalies of TotCO, TotO₃, TotH₂O, SKT and the corresponding standard deviation increased in 2002 ~ 2005, which indicate the gases degassing is temporal inhomogeneity. This might attribute to the degassing in the volcanic region under action of tectonic stress and volcanic activities. According to the field observation, the degassed gases were deduced might origin from the mantle. However, the migration of mantle materials did not last long period during the volcanic activities. The anomalies of SKT during the volcanic activities period might relate to the enhanced pulling-apart of faults in the area during the subduction process of Pacific slab beneath the Asian slab. Meanwhile, the results also show chemical reaction between the degassed gases and the components in the atmosphere. The results enriched the evidence from hyperspectral satellite data to the volcanic activities and favored the monitoring to the volcano activities.

Key words Remote sensing gas geochemistry; CO; O₃; H₂O; Surface temperature; MOPITT; AIRS; Changbai Volcano; Volcanic activity

摘 要 长白山火山区是我国具有潜在喷发危险的活火山, 在 2002 ~ 2005 年火山活动性增强出现了岩浆房扰动。利用卫星遥感技术具有观测范围大、观测时间长且连续的优势。因此, 本文利用对流层污染探测仪 (MOPITT) 和大气红外探测仪 (AIRS) 高光谱遥感数据提取了 2002 ~ 2005 年长白山天池火山区 CO 总量、O₃ 总量、水汽总量和地表温度异常信息, 讨论了高光谱遥感气体地球化学异常信息与火山活动性之间的关系, 并对 2002 ~ 2005 年长白山天池火山区火山活动性进行了研究。结果表明, 高光谱遥感数据观测到的气体地球化学 (CO、O₃、水汽) 异常与地震、形变监测结果以及地面流体 (CO₂、He、H₂) 观测结果相一致, 表明 MOPITT 和 AIRS 高光谱遥感卫星观测到的气体异常变化较好地反映了 2002 ~ 2005 年大规模的深部岩浆局部扰动。在 2002 ~ 2005 年火山活动期间, CO 总量、O₃ 总量、水汽总量和地表温度均出现了显著异常且异常出现时段相应准偏差显著增大, 反映了气体逸出量在时间上具有不均一性, 可能与火山、地震活动过程中地应力的作用和变化有关。从气

^{*} 本文受国家自然科学基金项目 (41572321) 和中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB03010600) 联合资助。

第一作者简介: 孙玉涛, 女, 1984 年生, 博士生, 第四纪地质学专业, E-mail: sunyutao@mail.iggcas.ac.cn

^{**} 通讯作者: 郭正府, 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 火山学专业, E-mail: zgguo@mail.iggcas.ac.cn

体异常持续的时间以及地面观测结果综合分析,2002~2005 年岩浆房扰动并没有产生长时间的地幔物质流的上升和迁移。在火山活动性增强的时间段内,地表温度出现异常低值,这可能与太平洋板块俯冲过程中引起的断裂拉张增强有关。此外,火山活动过程中逸出的气体进入大气圈产生大气化学反应也会导致高光谱遥感所观测到的气体地球化学异常。研究结果为 2002~2005 年长白山火山活动性的研究提供了来自高光谱遥感数据的气体地球化学新证据,也对高光谱分辨率遥感数据在火山活动规律的研究以及火山监测中的应用具有一定意义。

关键词 遥感地球化学;CO;O₃;水汽;地表温度;MOPITT;AIRS;长白山;火山活动性

中图法分类号 P317

1 引言

长白山天池火山位于我国吉林省与朝鲜接壤的国境线上,是一座处于休眠状态的巨型活火山,全新世曾发生过多次规模巨大的火山喷发,是我国第四纪火山活动最强烈地区之一(刘若新等, 1992; 樊祺诚等, 2005, 2006, 2007; 刘嘉麒, 1999; Xu *et al.*, 2012; Wei *et al.*, 2013)。对长白山天池火山岩浆演化、火山岩分布特征、地球物理深部探测以及大地电磁观测证实,长白山天池火山之下存在双层岩浆房(金伯禄和张希友, 1994; 樊祺诚等, 2005; 汤吉等, 2006; Zhao *et al.*, 2009; 仇根根等, 2014)。热红外遥感研究结果也显示,长白山天池火山区地表具有明显的岩浆扰动导致的温度热异常(季灵运等, 2009)。大量地震、形变以及温泉水化学等监测结果显示,2002 年 7 月以来,长白山火山区火山活动明显增强(吕政等, 2007; 刘国明, 2011; Xu *et al.*, 2012),认为在 2002~2005 年期间,火山活动性增强,进入了岩浆房的“扰动”阶段(吕政等, 2007; 刘国明, 2011; Xu *et al.*, 2012)。长白山及其周边地区人口稠密,有水电站、水库、工厂等重要基础设施。一旦长白山火山在未来喷发,其所造成的经济损失和灾难性后果将不堪设想(刘嘉麒等, 1999; Wei *et al.*, 2003; Bao *et al.*, 2011)。因此,加强对长白山火山活动性的监测具有十分重要的科学和现实意义。

大量研究表明,在火山活动过程中,火山气体能够快速地从上升的岩浆中出溶并到达地表,可以近乎实时地指示火山地下深部的岩浆扰动过程(Baubron *et al.*, 1991; Allard *et al.*, 1991; Granieri *et al.*, 2006; Lewicki *et al.*, 2007)。对火山气体的成分和释放量变化的连续监测也成为国际火山学界公认的监测火山区下部岩浆活动状态和预测火山未来喷发的有效方法之一(Hernández *et al.*, 2001; Frondini *et al.*, 2004; Chiodini *et al.*, 2010; 郭正府等, 2014, 2015)。与常规地面监测相比,利用卫星遥感技术对火山活动的前兆信息研究具有覆盖范围广、效率高和不受地面观测条件限制等优点,可以对火山活动状况进行全天候观测,以弥补地面观测在时间和空间上的限制,因此这一方法在国际火山研究中已经取得显著成效,并越来越引起国内外火山学界的广泛关注(Dean *et al.*, 2002, 2004; Wright *et al.*, 2002, 2004; 屈春燕等, 2006; 季灵运等, 2009; 李辉等, 2011; Clarisse *et al.*, 2012; Carboni *et al.*, 2012; McCormick *et al.*, 2015; Telling

et al., 2015)。然而,由于大气成分探测对光谱分辨率的要求较高,目前应用卫星遥感技术进行火山活动的监测和预测多集中在利用多光谱遥感数据对火山活动有关的热异常研究(Dean *et al.*, 2002, 2004; Wright *et al.*, 2002, 2004; 屈春燕等, 2006; 季灵运等, 2009; 李辉等, 2011)。20 世纪 90 年代开始,随着遥感光谱分辨率的进一步提高,星载高光谱红外传感器具有光谱通道数多且连续、光谱分辨率高的优势,在红外光谱区富含丰富的大气成分(如 CO、O₃、CH₄、水汽等)诊断性光谱特征,近年来被逐步应用到地震有关的气体地球化学研究(Dey *et al.*, 2004; 姚清林等, 2005; 郭广猛等, 2006; Singh *et al.*, 2007; 孙玉涛等, 2014)以及与火山活动有关的气体(主要是 SO₂)释放研究中(Wright *et al.*, 2005; Prata and Bernardo, 2007; Clarisse *et al.*, 2012; McCormick *et al.*, 2015; Telling *et al.*, 2015)。如, Wright *et al.* (2005)、Prata and Bernardo (2007)、McCormick *et al.* (2015)、Telling *et al.* (2015) 利用大气红外探测仪(Atmospheric Infrared Sounder, AIRS)、TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)、OMI (Ozone Monitoring Instrument)、GOME (Global Ozone Monitoring Experiment)、SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography)、OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite) 等高光谱卫星传感器对马里亚纳群岛 2003 年 5~6 月喷发的 Anatahan 火山以及勘察加半岛 2012~2013 年喷发的 Plosky Tolbachik 火山 SO₂ 喷发量以及火山烟羽形态等进行了反演,结果表明,Anatahan 火山约有 85% 的 SO₂ 以火山喷发的形式释放并进入大气(McCormick *et al.*, 2015)。Telling *et al.* (2015) 对高光谱遥感数据还利用快速傅里叶变换(FFT)多锥度法(MTM)分析出 Plosky Tolbachik 火山的周期喷发特征。然而,除 SO₂ 外,火山活动所释放的气体还包括 H₂、CO、CO₂、水汽、H₂S 等成分,这些气体成分在一定程度上对火山活动性也具有一定的指示作用(上官志冠和武成智, 2008)。火山活动所释放的这些气体向上逸散并进入大气,从而可以被高光谱遥感卫星所观测。因此,本文选择具有 CO、O₃、水汽等多种痕量气体成分观测种类的对流层污染探测仪(Measurement of Pollution In The Troposphere, MOPITT)和大气红外探测仪(AIRS)两种高光谱遥感存档数据,对长白山火山区 2002~2005 年火山活动有关的气体地球化学异常(CO、O₃ 和水汽)等进行研究,为 2002~2005 年长白山火山活动性提供来自高光谱遥感数据的气体地球化学新证据,

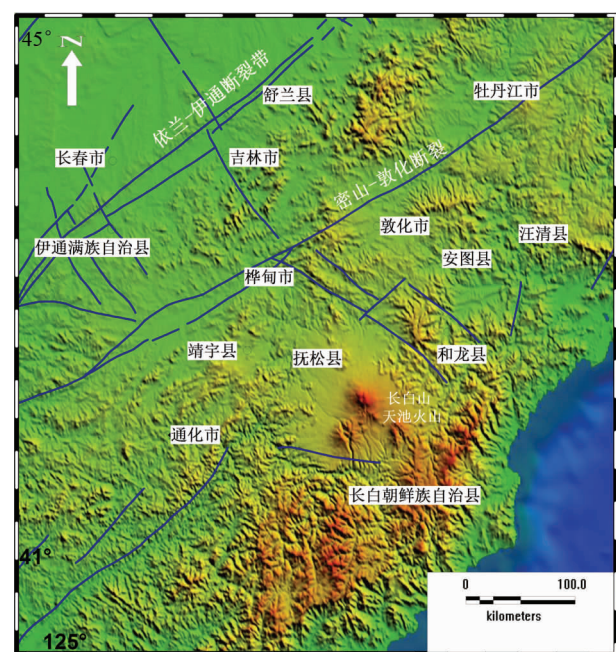


图1 长白山火山区位置及断裂分布图

Fig.1 Sketch map showing the location of Changbai volcano and fault distributions

对高光谱遥感技术在火山活动性监测中的应用前景进行探索。

2 地质背景

长白山火山区位于欧亚板块与太平洋板块相互作用的弧后构造环境,华北板块北东缘与中生代北东向滨太平洋火山造山带交接处(金伯禄和张希友,1994;刘嘉麒,1999),属鸭绿江-珲春裂谷带(金伯禄和张希友,1994)。长白山火山区在广义上包括我国境内的长白山天池火山、望天鹄火山、图们江火山和龙岗火山,是我国最大的第四纪火山岩分布区(樊祺诚等,2007)。火山区内发育一系列平行于NE-SW向的构造断裂(如敦化-密山断裂、依兰-伊通断裂)以及NW-SE向断裂等(金伯禄和张希友,1994)(图1)。长白山火山的喷发经历了粗面玄武岩造盾、粗面岩、碱流岩造锥和全新世碱流质岩浆喷发等阶段(樊祺诚等,2006)。K-Ar年龄测定以及以往研究结果表明,图们江火山和望天鹄火山活动始于上新世,喷发时代分别为上新世-中更新世(5.5~0.19Ma)和上新世-早更新世(4.77~2.12Ma)(樊祺诚等,2007)。天池火山和龙岗火山均属于第四纪火山,喷发活动从早更新世(约2Ma)持续到全新世(樊祺诚等,2006)。

3 数据和方法

MOPITT 和 AIRS 分别为搭载于极轨卫星 EOS-Terra 和

EOS-Aqua 卫星平台上的高光谱分辨率传感器。MOPITT 传感器由加拿大欧空局于1999年12月发射升空,2000年3月开始向地面提供观测数据,第一次连续全面地提供了覆盖全球的CO观测数据。MOPITT 传感器水平分辨率22km,扫描宽度640km,垂直分辨率3km,共8个波段(Deeter, 2011),可对全球对流层CO和CH₄总柱含量进行测量。由于发射后故障,目前只有4个波段进行工作,可对全球对流层CO总柱含量进行观测。AIRS 传感器于2002年5月发射升空,数据起始于2002年9月。AIRS 拥有2378个连续的红外光谱通道以及4个可见光/近红外通道,扫描带宽1650km,天底点空间分辨率13.5km,可对大气CO、CH₄、O₃、水汽等气体成分以及地表温度、射出长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)等进行连续系统观测(Won, 2008)。由此可见,MOIPTT 高光谱遥感数据和AIRS 高光谱遥感数据在观测时间和观测种类上具有互补性,因此两种数据相结合可以对气体地球化学异常信息进行多指标综合研究。

MOPITT 和 AIRS 数据可从NASA 戈达德地球科学数据和信息服务中心(GES DISC, <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/data-holdings>)获取。研究中所用的数据为MOPITT 和AIRS 的三级产品数据,由对应的MOPITT 和AIRS 二级产品数据经格网化得到,是对应个点日平均产品数据的简单算术平均值(Won, 2008)。MOPITT 三级产品数据文件包括一氧化碳总柱含量、地表温度白天数据(Day)和夜间数据(Night)、地表温度等。与MOPITT 三级标准产品数据相似,AIRS 三级标准产品数据文件包括升轨数据(ascending)、降轨数据(descending)、微波波段升轨数据(ascending_MW_only)和微波波段降轨数据(descending_MW_only)以及地理位置(location)五部分。主要参数包括臭氧柱总量、一氧化碳柱总量、一氧化碳混合比等以及这些参数平均值、标准偏差等统计参数(Won, 2008)。为了减小白天太阳辐射等因素的影响,研究中均采用夜间降轨数据进行异常信息提取,所使用的数据为MOPITT 夜间三级月平均标准产品数据(MOP03JM)和AIRS 降轨数据中三级月平均标准产品数据(AIRX3STM)。两种数据空间分辨率均为1°×1°,采用HDF(Hierarchical Data Format)格式(NASA 采用的用于EOS 数据存储的标准文件格式)存储。数据可通过MATLAB 软件直接读取。

本文采用差值的方法从MOPITT 和AIRS 高光谱遥感卫星数据中对异常信息进行提取。首先,用同一月多年气体含量的算术平均值(公式1)建立气体变化基准场($\bar{S}$):

$$\bar{S}(x_{ij}, y_{ij}, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S(x_{ij}, y_{ij}, t) \quad (1)$$

其中, N 为可用数据年数,代表各格点位年度或月度气体含量值,为研究区位置(x, y)处 t 时刻 N 年内相应月份气体变化基准场。

其次,从MOPITT 和AIRS 三级标准产品数据中提取长白山天池火山周围四个像元CO总量、O₃总量、水汽总量以

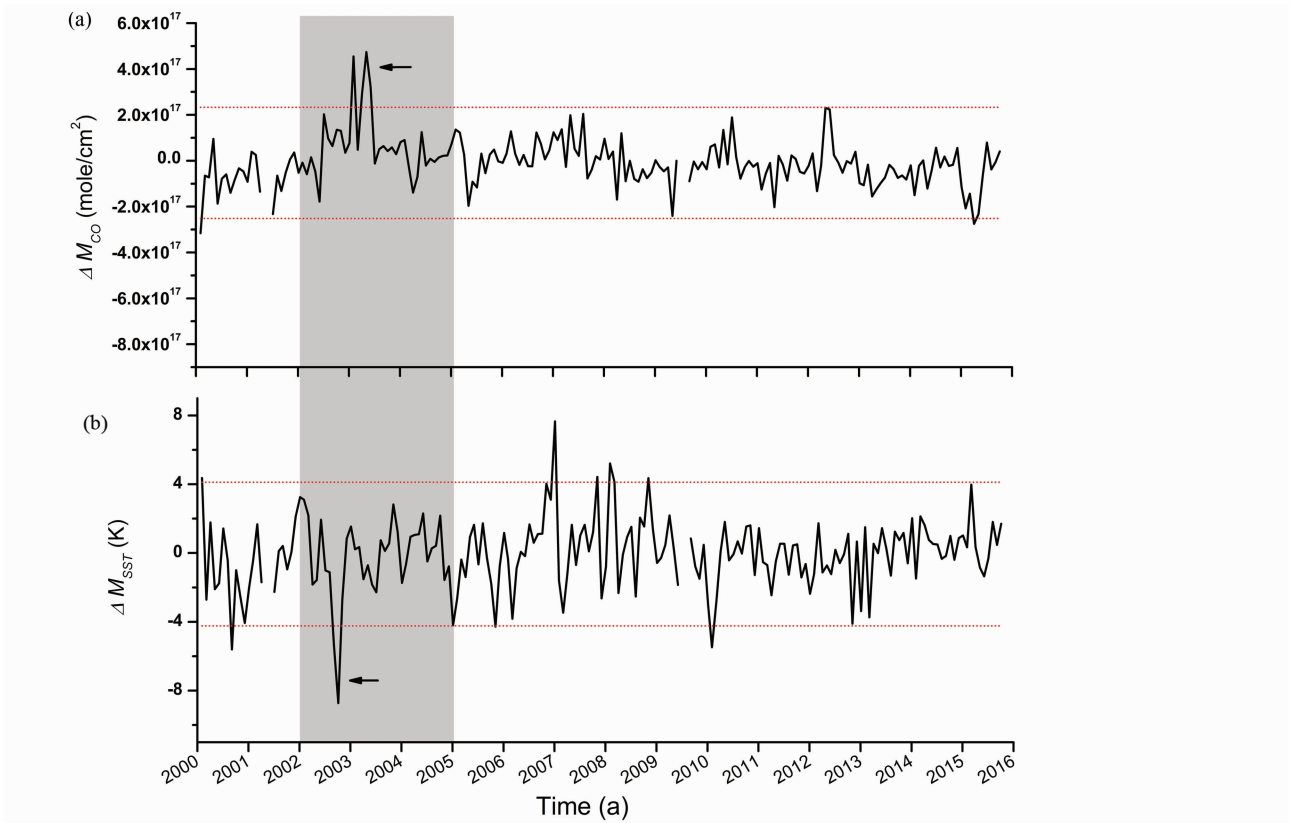


图2 MOPITT 降轨数据观测的长白山天池火山区 2002 ~ 2005 年 CO 总量年变残差变化(ΔM_{CO})与(ΔM_{SST})变化
灰色区域表示本次研究的时间段,红色点线表示异常阈值. 年变残差的变化超出异常界阈值则视为异常
Fig.2 Residual variations of total CO (ΔM_{CO}) and surface skin temperature (ΔM_{SST}) in the Changbai volcano from MOPITT satellite data in descending mode
Grey region and red dotted lines showing the studied period (2002 ~ 2005) and the thresholds, respectively. The anomaly is identified if the residual variations exceed the established threshold

及地表温度值作为观测值(S)。将观测值(S)去除气体变化基准场($\bar{S}$)后的残余部分称为年变残差 $\Delta M_{(t)}$ (公式 2)。

$$\Delta M(t) = S(x_{i,j}, y_{i,j}, t) - \bar{S}(x_{i,j}, y_{i,j}, t) \tag{2}$$

数据分析过程中,采用年变残差的平均值加减 2 倍标准差作为异常阈值,对气体异常进行判断。若年变残差 ($\Delta M_{(t)}$) 的变化超出异常界阈值,则视为气体异常。

4 结果

4.1 MOPITT 观测到的气体地球化学异常

图 2a 和图 2b 分别显示了从 MOPITT 高光谱遥感数据提取的长白山天池火山区 2002 ~ 2015 年间 CO 总量年变残差 (ΔM_{CO}) (图 2a) 和地表温度年变残差 (ΔM_{SST}) (图 2b) 的变化情况。2002 ~ 2005 年, ΔM_{CO} 从 2002 年 8 月开始升高, 在 2003 年超出异常阈值, 出现多年 ΔM_{CO} 异常高值 (4.7×10^{17} mole/cm²)。在多年连续观测时间序列中, ΔM_{SST} 在 2002 年出现异常低值 (-8.7 K) (图 2a)。长时间序列 (2002 ~ 2015 年) 残差变化显示, 除 2002 ~ 2005 年异常外, ΔM_{SST} 在

2006 ~ 2008 年出现异常波动升高, 而同时期 ΔM_{CO} 在异常阈值内也呈升高趋势, 但未突破异常阈值 (图 2a)。在 2010 年 3 月, ΔM_{SST} 再次突破异常阈值出现低值 (-5.4 K) (图 2b)。

4.2 AIRS 观测到的气体地球化学异常

与 MOPITT 高光谱遥感数据对长白山天池火山区 2002 ~ 2005 年观测相比, 利用 AIRS 月平均数据提取的长白山火山区 ΔM_{CO} (图 3a) 和 ΔM_{SST} (图 3d) 变化观测趋势相一致。从 MOPITT 和 AIRS 高光谱遥感数据观测到的 ΔM_{CO} 较多年平均数据呈现出明显的异常变化 (异常衬度可达 1.39)。除 ΔM_{CO} 和 ΔM_{SST} 外, 从 AIRS 高光谱遥感数据观测到 O₃ 总量年变残差 (ΔM_{O_3}) (图 3b) 和水汽总量年变残差 (ΔM_{H_2O}) (图 3c) 也在 2002 ~ 2005 年时间段内出现异常。其中, ΔM_{H_2O} 在 2003 年 7 月出现异常低值 (图 3c), 而 ΔM_{O_3} 异常则滞后于 ΔM_{CO} 、 ΔM_{H_2O} 、 ΔM_{SST} 异常, 在 2002 ~ 2005 年火山活动期间, 分别在 2003 年 12 月和 2004 年 12 月出现两次异常低值 (图 3c)。

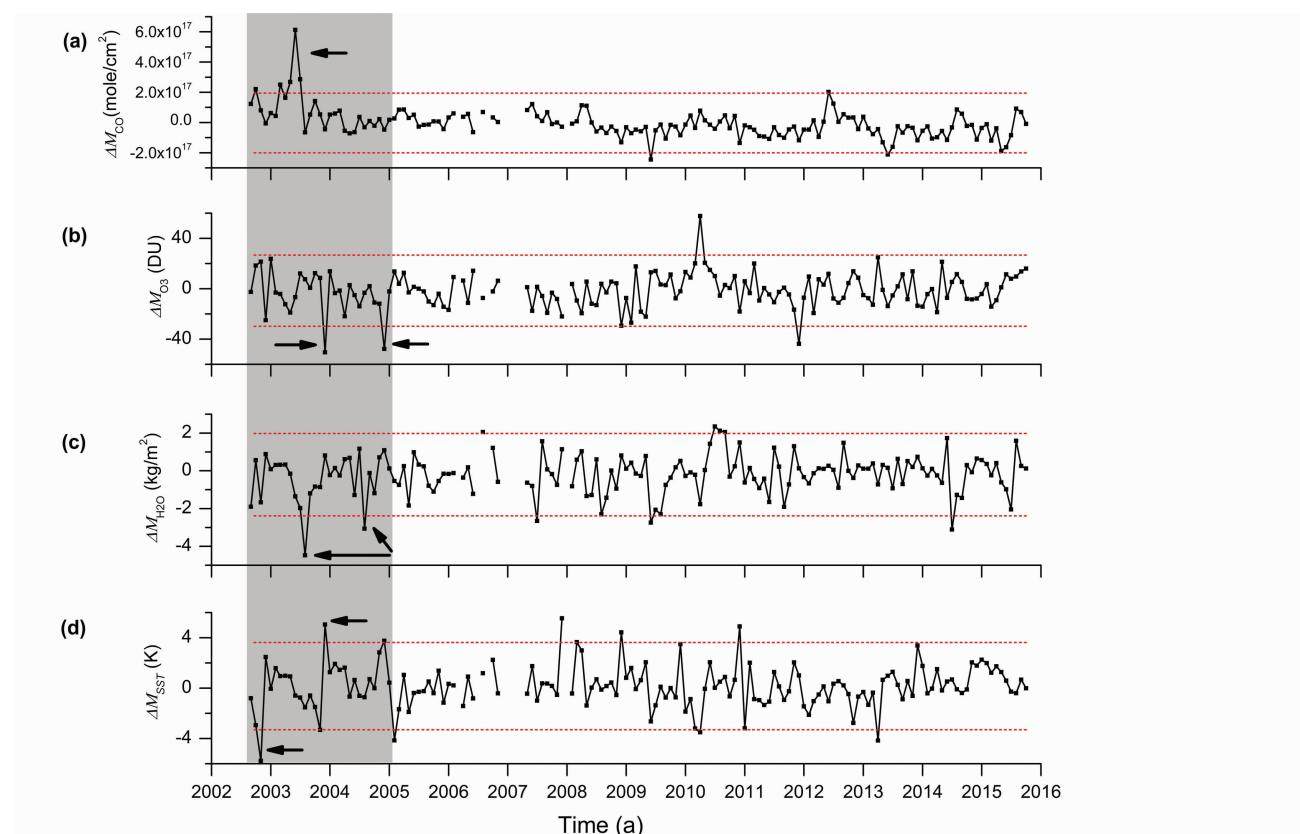


图3 AIRS 降轨数据观测的长白山天池火山区 2002~2005 年 CO 总量年变残差 (ΔM_{CO})、O₃ 总量年变残差 (ΔM_{O_3})、水汽总量年变残差 (ΔM_{H_2O}) 以及地表温度年变残差 (ΔM_{SST}) 变化

灰色区域表示本次研究的时间段,红色点线表示异常阈值. 年变残差的变化超出异常界阈值则视为异常

Fig. 3 Residual variations of total CO column (ΔM_{CO}), total O₃ (ΔM_{O_3}), total H₂O vapor (ΔM_{H_2O}), and surface skin temperature (ΔM_{SST}) in the Mt. Changbai volcano from the AIRS satellite data in descending mode

Grey region and red dotted lines showing the studied period (2002~2005) and the thresholds, respectively. The anomaly is identified if the residual variations exceed the established threshold

5 讨论

5.1 高光谱遥感气体地球化学异常分析

将 MOPITT 和 AIRS 高光谱遥感数据观测结果与长白山火山活动性记录对比结果显示, ΔM_{CO} 、 ΔM_{H_2O} 、 ΔM_{SST} 在与火山活动具有同步性。自 2002 年 8 月起,从 MOPITT 和 AIRS 高光谱遥感卫星观测到的 ΔM_{CO} 打破多年变化背景值并呈现高低波动的变化特征。此外,在长白山活动性增强的时间段内(2002~2005),从 AIRS 高光谱遥感数据观测的 CO 总量、O₃ 总量、水汽总量以及地表温度标准偏差的变化都相应地增大(文中未列出)。其中,CO 标准偏差变化最大,标准偏差可达 $8.02 \times 10^{17} \text{ mole/cm}^2$, 约为无异常时段的 4 倍。O₃ 标准偏差(418.7DU)、水汽标准偏差(9.5 kg/m^2)以及地表温度标准偏差(286.1K)变化也都在该时间段内增大。标准偏差增大表明观测数据的离散性增大,在一定程度上反映了火山活

动所导致的气体释放的不均一性增大。前人研究表明,从 2002 年 6 月期,长白山天池火山区地震活动性增强,火山地震的频次和能量逐年上升,并发生了一系列震群活动(刘国明等, 2011; Wei *et al.*, 2013, 图 4)。因此, ΔM_{CO} 在此时间段内的高低波动特征可能与火山活动性有关。长白山天池火山区 2002~2005 年地震尾波分析结果表明,长白山天池火山区具有相对较强的构造活动性(刘国明等, 2011)。2002 年 6 月以来的地震记录频谱分析和时频分析的结果也表明,长白山天池火山在 2002~2005 年间的地震主要为构造型火山地震(刘国明等, 2006; Liu and Li, 2015)。从 MOPITT 和 AIRS 高光谱遥感数据观测到的气体地球化学异常可能与地震活动过程中地应力的作用和变化有关(图 4)。在地应力的作用下,火山活动向大气中逸散大量气体,导致大气中气体含量出现异常(汪成民和李宣璐, 1991; Du *et al.*, 2008)。

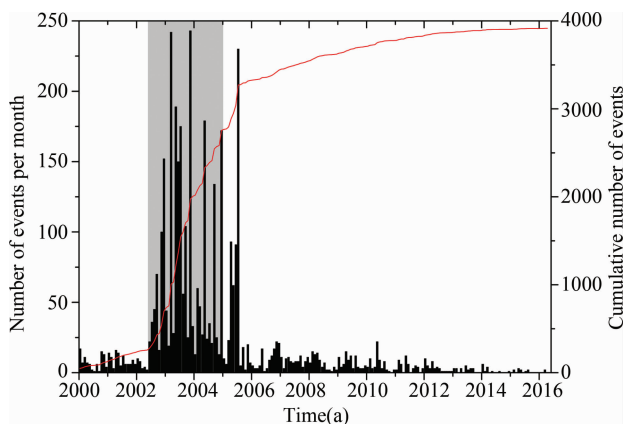


图4 长白山天池火山区 30km 范围内 2000 ~ 2016 年 $M \geq 1.0$ 火山地震累积分布图(据 Liu *et al.*, 2011 修改)

灰色区域表示本次研究的时间范围

Fig. 4 Cumulative number of earthquakes with magnitude ≥ 1.0 occurred from 2000 to 2016 in the scope of about 30km around Mt. Changbai volcano

Grey region showing the studied period

5.2 气体异常来源分析

热活动性是火山活动的主要特征(Francis, 2000; 屈春燕等, 2006)。地下岩浆中包含大量挥发组分或气体(CO 、 CO_2 、 He 、 H_2 等)(李霓和刘若新, 2000; 杜乐天, 2006)。 H_2 是地球内部流体组分之一,与温度有关,通常被看做高温气体(上官志冠和武成智, 2008)。前人利用遥感数据对地震前后水汽存在明显的负异常研究,认为水汽负异常可能与地震孕震过程中潜热通量增加有关(Singh *et al.*, 2007; Vishnu *et al.*, 2012)。利用卫星热红外遥感技术,通过 Landsat TM/ETM 以及 ASTER 遥感影像对长白山火山热活动性的反演结果表明,长白山火山在 1999 ~ 2005 年火山扰动期间出现了明显的温度热异常(季灵运等, 2009)。因此,在 2002 ~ 2005 年长白山天池火山活动期间,从高光谱卫星遥感数据观测到的 2003 年水汽明显负异常可能与火山活动导致的潜热通量增加有关(Dey *et al.*, 2004)。

MOPITT 和 AIRS 高光谱遥感数据观测到的 CO 总量时间序列的变化趋势与地面实地连续观测的 CO_2 、 He 、 H_2 含量变化趋势相一致(图 5)。高光谱遥感数据观测到的 CO 总量与地面观测的 CO_2 、 He 、 H_2 含量在 2003 年均打破多年变化趋势,出现了异常高值(图 5)。在火山气体成分中, CO_2 是火山气体的主要成分之一。在压力较大、源区较深的情况下,岩浆囊内部 CO_2 可与 H_2S 发生化学反应生成 CO ($3\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow 3\text{CO} + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$),因此, CO 通常是气体源区具有更高压力环境条件的“指示剂”(上官志冠和武成智, 2008)。 He 气是惰性稀有气体,具有质量轻、运移快、穿透力极强的特点,并且在运移过程中没有化学干扰,是气体源区研究的“指纹性”气体(上官志冠和武成智, 2008)。地面 $^3\text{He}/^4\text{He}$

比值结果表明长白山天池火山区气体来源主要来自于地幔(Wu *et al.*, 2009; 刘国明等, 2011; Wei *et al.*, 2013)。同时期地表形变监测结果也表明,在 2002 ~ 2005 年天池火山区地面发生了明显膨胀变形,垂直方向水准路线高差在此 3 年期间累积变化达 6.8cm,且变形量与靠近火山口的距离成正比,可能为岩浆活动所致(李克等, 2009)。

因此,综合对比分析遥感数据和地面观测结果, MOPITT 和 AIRS 高光谱遥感卫星观测到的气体异常变化是对 2002 ~ 2005 年大规模的深部岩浆局部扰动的反映。在 2002 ~ 2005 年火山活动性增强阶段,岩浆房的岩浆或流体活动导致地壳岩石孔隙压力增大,产生脆性破裂,导致火山地震活动频发。从异常持续的时间来看,这次扰动并没有产生长时间(5 个月,图 2 和图 3)的地幔物质流的上升和迁移(上官志冠和武成智, 2008)。

5.3 高光谱遥感气体地球化学异常机制

长白山天池火山区地表温度在 2002 年 11 月出现温度异常低值,与利用中分辨率成像光谱仪(MOIDS)地表温度产品对东北地区依兰-伊通断裂带地表温度分析的结果相一致(任雅琼等, 2012),即在 2001 ~ 2002 年间温度均出现异常低值。实验岩石学表明,岩石弹性变形的压力与温度关系表现为加压升温,减压降温(刘培洵等, 2004)。在构造上,长白山火山区位于太平洋板块俯冲带、日本海弧后扩张区域,东北裂谷系最外侧的密山-敦化断裂以东地区。研究区内分布有依兰-伊通断裂和密山-敦化断裂两条大断裂(图 1)。对西北太平洋板块阶段性、俯冲带上中深源地震与长白山火山地震年频度变化趋势关系研究表明, 35°N 以北俯冲带上深度 $\geq 150\text{km}$ 的 $M5.0$ 级以上中深源地震活动对长白山火山地震具有明显的扰动作用(王敏等, 2011; 吕政等, 2007)。在本次研究的时间段内,2002 年 6 月 28 日、2010 年 2 月 18 日在密山-敦化断裂带发生 $M7.1$ 级地震。因此, MOPITT 和 AIRS 高光谱遥感观测到的地表温度异常低值可能与太平洋板块俯冲过程中断裂的拉张增强有关(任雅琼等, 2012)。

AIRS 高光谱遥感卫星观测到的 O_3 异常主要来自于光化学反应过程(Ganguly, 2011)。大气中 CO 浓度与 O_3 浓度呈正相关关系,即大气中 CO 含量的增加会导致 O_3 含量升高(Fishman and Seiler, 1983)。然而,2002 ~ 2005 年长白山火山活动期间, CO 含量异常升高并没有伴随着 O_3 含量的升高,这表明在此时间段 CO 不是导致 O_3 异常的主要原因。长白山天池火山区 H_2O 总量与 O_3 总量呈负相关($r = -0.66$),表明水汽可能是导致 O_3 总量减少的原因之一。这可能是由于对流层中水汽的增加可导致 OH^- 、 HO_2 等自由基浓度的增加,通过光化学反应而导致大气中 O_3 减少(刘煜等, 1990)。此外, H_2S 和 SO_2 是火山气体的成分,在火山活动前及活动期间释放量会出现升高(Clarisse *et al.*, 2012; Carboni *et al.*, 2012; McCormick *et al.*, 2015; Telling *et al.*, 2015)。虽然处于休眠期的长白山天池火山区释放的 H_2S (0.17% ~

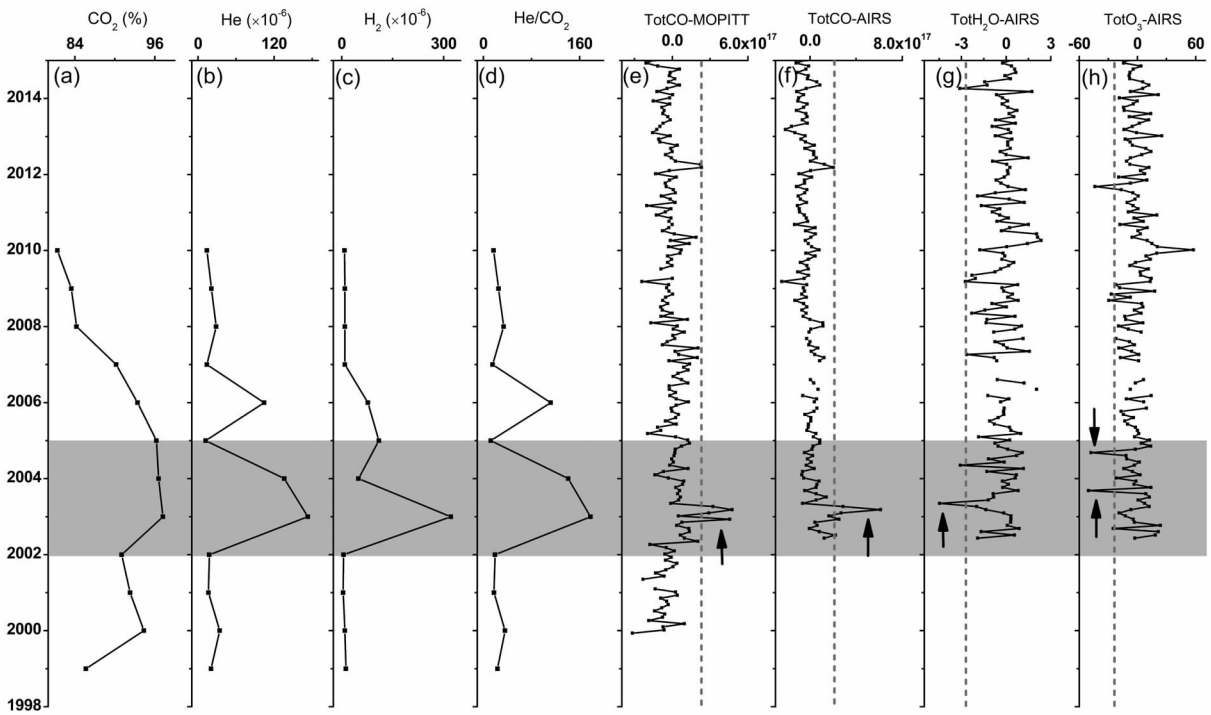


图5 长白山天池火山区地面温泉逸出气(CO₂、He、H₂)年均浓度变化(a-d)与MOPITT和AIRS高光谱遥感卫星数据气体观测时间序列(e-h)对比(地面观测数据据Wei *et al.* , 2013)
灰色区域表示本次研究的时间段,红色点线为异常阈值,黑色箭头所指位置为异常出现时间

Fig. 5 Comparison of degassed gases (CO₂, He, and H₂) from the hot spring in the Mt. Changbai volcano and time series of gases observed from the MOPITT and AIRS hyper-spectral satellite archived data (ground observation data from Wei *et al.* , 2013)
Grey region showing the studied period. Red dotted lines and black arrows represent the anomalous thresholds and the gaseous anomalies

0.36%) 和 SO₂ (0.04% ~ 0.06%) 含量较低,但在低背景条件下,含硫物质的少量增加就会导致逸出气体发生异常变化(上官志冠和武成智, 2008)。长白山天池火山区在2002~2005年火山活动过程中释放的SO₂形成的硫酸或硫酸盐颗粒与尘埃(杨理权等, 1998; 贾龙等, 2006),可能是导致O₃在2003年出现异常低值的原因。然而,现今尚未有对长白山含硫气体的系统、连续测量与报道,导致O₃低值异常的形成机制仍需进一步探讨。

6 结论

利用MOPITT和AIRS高光谱遥感数据提取了长白山天池火山区CO总量、O₃总量、水汽总量和地表温度观测数据,建立了气体变化基准场。通过长时间序列气体年变残差的变化,对2002~2005年长白山天池火山区火山活动性进行了研究。研究结果表明:

(1)MOPITT和AIRS高光谱遥感数据在2002~2005年均出现了CO、O₃、水汽和地表温度的异常。这些异常出现时间与长白山天池火山区地震时空分布、震级以及地面流体观测数据具有高的一致性,表明高光谱遥感观测到的气体异常

与火山、地震活动过程中地应力的作用和变化有关;
(2)在火山活动性增强的时间段内,地表温度和水汽总量的负异常可能分别与太平洋板块俯冲过程中引起的断裂拉张增强以及潜热通量的增加有关;
(3)火山活动过程中逸出的气体进入大气圈产生大气化学反应也会导致高光谱遥感卫星所观测到的火山区气体异常。

致谢 NASA 戈达德地球科学数据和信息服务中心为本次研究提供了MOPITT和AIRS高光谱分辨率卫星遥感数据;两位审稿人对文章提出的建设性修改意见,使文章得以逐步修改完善;在此一并致以衷心感谢。

References

Allard P, Carbonnelle J, Dajlevic D, Le Bronec J, Morel P, Robe MC, Maurenas JM, Faivre-Pierret R, Martin D, Sabroux JC and Zettwoog P. 1991. Eruptive and diffuse emissions of CO₂ from Mount Etna. *Nature*, 351(6325): 387-391
 Bao KS, Wang GP, Lu XG and McLaughlin NB. 2011. A potential flood hazard caused by Tianchi volcano eruption in Changbai Mountain, Northeast China. *Journal of Mountain Science*, 8(5): 677-681

- Baubron JC, Allard P, Sabroux JC, Tedesco D and Toutain JP. 1991. Soil gas emanations as precursory indicators of volcanic eruptions. *Journal of the Geological Society*, 148(3): 571–576
- Chen SY, Liu LQ, Liu PX, Ma J and Chen GQ. 2009. Theoretical and experimental study on relationship between stress-strain and temperature variation. *Science in China (Series D)*, 52(11): 1825–1834
- Chiodini G, Caliro S, Cardellini C, Granieri D, Avino R, Baldini A, Donnini M and Minopoli C. 2010. Long-term variations of the Campi Flegrei, Italy, volcanic system as revealed by the monitoring of hydrothermal activity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B3): B03205
- Clarisse L, Hurtmans C, Clerbaux C, Hadji-Lazaro J, Ngadi Y and Coheur PF. 2012. Retrieval of sulphur dioxide from the infrared atmospheric sounding interferometer (IASI). *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(3): 581–594
- de Leeuw GAM, Hilton DR, Güleç N and Mutlu H. 2010. Regional and temporal variations in CO_2/He , $^3\text{He}/^4\text{He}$ and $\delta^{13}\text{C}$ along the North Anatolian Fault Zone, Turkey. *Applied Geochemistry*, 25(4): 524–539
- Dean KG, Dehn J, Engle K, Izbekov P and Papp K. 2002. Operational satellite monitoring of volcanoes at the Alaska volcano observatory. *Advances in Environmental Monitoring and Modelling*, 1(3): 70–97
- Dean KG, Dehn J, Papp KR, Smith S, Izbekov P, Peterson R, Kearney C and Steffke A. 2004. Integrated satellite observations of the 2001 eruption of Mt. Cleveland, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135(1–2): 51–73
- Deeter MN. 2011. MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere) Version 5 Product User's Guide. Boulder, CO: MOPITT Algorithm Development Team
- Dey S, Sarkar S and Singh RP. 2004. Anomalous changes in column water vapor after Gujarat earthquake. *Advances in Space Research*, 33(3): 274–278
- Du J, Si X, Chen Y et al. 2008. Geochemical anomalies connected with great earthquakes in China. In: Stefánsson O (ed.). *Geochemistry Research Advances*. New York: Nova Science Publishers, 57–92
- Du LT. 2006. The five gas spheres of the Erath and natural gas exploitation from middle crust. *Natural Gas Geoscience*, 17(1): 25–30, 35 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC, Sui JL, Sun Q, Li N and Wang TH. 2005. Preliminary research of magma mixing and explosive mechanism of the Millennium eruption of Tianchi volcano. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1703–1708 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC, Sui JL, Wang TH, Li N and Sun Q. 2006. Eruption history and magma evolution of the trachybasalt in the Tianchi Volcano, Changbaishan. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1449–1457 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC, Sui JL, Li N, Sun Q and Xu YG. 2007. The magmatism and interactive eruption of the two magma chambers in the Tianchi Volcano, Changbaishan. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(4): 315–318 (in Chinese with English abstract)
- Fishman J and Seiler W. 1983. Correlative nature of ozone and carbon monoxide in the troposphere; Implications for the tropospheric ozone budget. *Journal of Geophysical Research*, 88(C6): 3662–3670
- Fronidini F, Chiodini G, Caliro S, Cardellini C, Granieri D and Ventura G. 2004. Diffuse CO_2 degassing at Vesuvio, Italy. *Bulletin of Volcanology*, 66(7): 642–651
- Ganguly ND. 2011. The impact of transported ozone-rich air on the atmospheric ozone content following the 26 January 2001 and 7 March 2006 Gujarat earthquakes. *Remote Sensing Letters*, 2(3): 195–202
- Granieri D, Carapezza ML, Chiodini G, Avino R, Caliro S, Ranaldi M, Ricci T and Tarchini L. 2006. Correlated increase in CO_2 fumarolic content and diffuse emission from La Fossa crater (Vulcano, Italy): Evidence of volcanic unrest or increasing gas release from a stationary deep magma body? *Geophysical Research Letters*, 33(13): L13316
- Guo GM, Cao YG and Gong JM. 2006. Monitoring anomaly before earthquake with MODIS and MOPITT data. *Advances in Earth Science*, 21(7): 695–698 (in Chinese with English abstract)
- Guo ZF, Zhang ML, Sun YT, Cheng ZH, Zhang LH and Liu JQ. 2015. Research advances in greenhouse gases degassing from Cenozoic volcanic active fields. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(4): 690–700 (in Chinese with English abstract)
- Hernández PA, Notsu K, Salazar JM, Mori T, Natale G, Okada H, Virgili G, Shimoike Y, Sato M and Pérez NM. 2001. Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu Volcano, Japan. *Science*, 292(5514): 83–86
- Ji LY, Xu JD, Lin XD and Luan P. 2009. Application of satellite thermal infrared remote sensing in monitoring Changbaishan Tianchi volcano activity. *Seismology and Geology*, 31(4): 617–627 (in Chinese with English abstract)
- Jia L, Ge MF, Xu YF, Du L, Zhuang GS and Wang DX. 2006. Advances in Atmospheric ozone chemistry. *Progress in Chemistry*, 18(11): 1565–1574 (in Chinese with English abstract)
- Jin BL and Zhang XY. 1994. *Researching Volcanic Geology in Mount Changbai*. Yanji: Education Publishing House of Northeast Korea Nation, 1–223 (in Chinese)
- King CY. 1986. Gas geochemistry applied to earthquake prediction: An overview. *Journal of Geophysical Research*, 91(B12): 12269–12281
- Lewicki JL, Oldenburg CM, Dobeck L and Spangler L. 2007. Surface CO_2 leakage during two shallow subsurface CO_2 releases. *Geophysical Research Letters*, 34(24): L24402
- Li H, Peng SB, Qiao WT, Lin MS, Wang ZS and Tian LQ. 2011. The distribution and activity of Cenozoic magma chamber in Tengchong volcano area deduced from the MODIS multi-temporal monthly night LST data. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 2873–2882 (in Chinese with English abstract)
- Li K, Liu JQ, Pan XD, Liu GM, Wu CZ and Guo F. 2009. Crust deformation monitoring and research in Tianchi volcanic area, Changbai Mountains from 2000–2007. *Seismology and Geology*, 31(4): 639–646 (in Chinese with English abstract)
- Li N and Liu RX. 2000. Analysis and estimate of volatile in Changbaishan Tianchi volcano's great eruption in Holocene epoch. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 357–361 (in Chinese with English abstract)
- Li T, Liu JQ, Wang XB, Guo ZF, Guo WF, Cheng ZH and Zhang ML. 2015. Geochemical characteristics and genesis of gases from Tianchi volcanic springs, Changbai Mountains, Jilin, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(6): 1192–1202 (in Chinese with English abstract)
- Liu GM, Zhang HR and Kong QJ. 2006. Analysis of the seismic activity at the Changbaishan Tianchi volcano. *Seismology and Geology*, 28(3): 503–508 (in Chinese with English abstract)
- Liu GM, Yang JK, Wang LJ and Sun JC. 2011. Analysis of Tianchi volcano activity in Changbai Mountain, NE China. *Global Geology*, 41(1): 44–53
- Liu GM, Yang JK, Wang LJ and Sun JC. 2011. Active level analysis of the Tianchi volcano in Changbaishan, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 30(4): 393–399 (in Chinese with English abstract)
- Liu GM and Li YS. 2015. Temporal velocity variations retrieved by seismic noise in Changbaishan volcano, NE China. *Journal of Volcanology and Seismology*, 9(2): 140–149
- Liu JQ. 1999. Volcanoes in China. Beijing: Science Press, 1–193 (in Chinese)
- Liu JQ, Guo ZF and Liu Q. 1999. Volcanic hazards and monitoring. *Quaternary Sciences*, (5): 414–422 (in Chinese with English abstract)
- Liu RX, Li JT, Wei HQ, Xu DM and Zheng XS. 1992. Volcano at Tianchi lake, Changbaishan Mt.: A modern volcano with potential danger of eruption. *Acta Geophysica Sinica*, 35(5): 661–665 (in Chinese with English abstract)

- Liu PX, Liu LQ, Chen SY, Xu DM, Ma J and Chen GQ. 2004. An experiment on the infrared radiation of surficial rocks during deformation. *Seismology and Geology*, 26 (3): 502 – 511 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Zhou XJ and Li WL. 1990. Numerical simulation for tropospheric ozone. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1(1): 45 – 56 (in Chinese with English abstract)
- Lü Z, Yang QF, Zhang HR, Liu GM and Gao JZ. 2007. Study of the relationship between Changbaishan Tianchi volcanic seismic activity and deep earthquakes in the Northwest Pacific subduction zone. *Seismology and Geology*, 29 (3): 470 – 479 (in Chinese with English abstract)
- Matsuo S. 1975. Chemistry of volcanic gases, Kazan. *Bulletin of Volcanological Society of Japan*, 20: 319 – 329
- McCormick B, Popp C, Andrews B and Cottrell E. 2015. Ten years of satellite observations reveal highly variable sulphur dioxide emissions at Anatahan Volcano, Mariana Islands. *Journal of Geophysical Research*, 120(14): 7258 – 7282
- Prata AJ and Bernardo C. 2007. Retrieval of volcanic SO₂ column abundance from Atmospheric Infrared Sounder data. *Journal of Geophysical Research*, 112 (D20): D20204
- Qiu GG, Pei FG, Fang H, Du BR, Zhang XB, Zhang PH, Yuan YZ, He MX and Bai DW. 2014. Analysis of magma chamber at the Tianchi volcano area in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Geophysics*, 57 (10): 3466 – 3477 (in Chinese with English abstract)
- Qu CY, Shan XJ and Ma J. 2006. Application of satellite thermal infrared remote sensing in detection of volcano activity. *Seismology and Geology*, 28(1): 99 – 110 (in Chinese with English abstract)
- Ren YQ, Chen SY and Ma J. 2012. Variation of land surface temperature in Yilan-Yitong fault zone of northeastern China. *Acta Seismologica Sinica*, 34(5): 698 – 705 (in Chinese with English abstract)
- Shangguan ZG and Wu CZ. 2008. Geochemical features of magmatic gases in the regions of dormant volcanoes in China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2638 – 2646 (in Chinese with English abstract)
- Singh RP, Cervone G, Kafatos M, Prasad AK, Sahoo AK, Sun D, Tang DL and Yang R. 2007. Multi-sensor studies of the Sumatra earthquake and tsunami of 26 December 2004. *International Journal of Remote Sensing*, 28(13 – 14): 2885 – 2896
- Francis P and Rothery D. 2000. Remote sensing of active volcanoes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 81 – 106
- Sun YT, Cui YJ, Liu YM, Du JG, Zhang WB and Zhang GY. 2014. Remote sensing anomalies of CO and O₃ related to two giant Sumatra earthquakes occurred in 2004 and 2005. *Remote Sensing Information*, 29(2): 49 – 55 (in Chinese with English abstract)
- Tang J, Zhao GJ, Wang JJ, Zhan Y, Deng QH and Chen XB. 2006. Study of the formation mechanism for volcanism in Northeast China based on deep electric structure. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1503 – 1510 (in Chinese with English abstract)
- Telling J, Flower VJB and Carn SA. 2015. A multi-sensor satellite assessment of SO₂ emissions from the 2012 – 13 eruption of Plosky Tolbachik volcano, Kamchatka. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 307: 98 – 106
- Vishnu R, Varikoden H, Kumar VA, Das SM, Kumar GM and Symon VNS. 2012. Abnormal modulation of atmospheric parameters during the tsunami of 2004. *Current Science*, 102(11): 1575 – 1596
- Wang CM and Li XH. 1991. Applications of fracture-gas measurement to the earthquake studies in China. *Earthquake Research in China*, 7 (2): 19 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Wang M, Li Q, Wang F, Zhang R, Wang YZ, Shi HB, Zhang PZ and Shen ZK. 2011. Far-field coseismic displacements associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake in Japan observed by Global Positioning System. *Chinese Science Bulletin*, 56 (23): 2419 – 2424
- Wei H, Sparks RSJ, Liu R, Fan Q, Wang Y, Hong H, Zhang H, Chen H, Jiang C, Dong J, Zheng Y and Pan Y. 2003. Three active volcanoes in China and their hazards. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(5): 515 – 526
- Wei HQ, Liu GM and Gill J. 2013. Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, Northeast China: Implications for possible future eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 75(4): 706
- Won YI. 2008. README document for AIRS level-3 version 5 standard products; Daily (AIRH3STD, AIRX3STD, AIRS3STD), 8-days (AIRH3ST8, AIRX3ST8, AIRS3ST8) & monthly (AIRH3STM, AIRX3STM, AIRS3STM). Georgios Britzoulakis, <http://daac.gsfc.nasa.gov/AIRS>
- Wright R, Flynn L, Garbeil H, Harris A and Pilger E. 2002. Automated volcanic eruption detection using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 82(1): 135 – 155
- Wright R, Flynn LP, Garbeil H, Harris AJL and Pilger E. 2004. MODVOLC: Near-real-time thermal monitoring of global volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135(1 – 2): 29 – 49
- Wright R, Carn SA and Flynn LP. 2005. A satellite chronology of the May-June 2003 eruption of Anatahan volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 146(1 – 3): 102 – 116
- Wu CZ, Liu GM and Wang P. 2009. Application of hot spring gases to the study of active volcanoes in the Changbaishan Mountain region, Northeast China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 28 (4): 445 – 448
- Xu JD, Liu GM, Wu JP, Ming YH, Wang QL, Cui DX, Shanguan ZG, Pan B, Lin XD and Liu JQ. 2012. Recent unrest of Changbaishan volcano, Northeast China: A precursor of a future eruption? *Geophysical Research Letters*, 39(16): L16305
- Yang LQ, Qiu JH and Zhao YL. 1998. Effects of volcanic aerosol on ozone change trends over Beijing. *Scientia Atmospherica Sinica*, 22 (5): 686 – 692 (in Chinese with English abstract)
- Yao QL, Qiang ZJ and Wang YP. 2005. CO release from the Tibetan Plateau before earthquakes and increasing temperature anomaly showing in thermal infrared images of satellite. *Advances in Earth Science*, 20(5): 505 – 510 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XC, Guo WS, Du JG, Wang CY and Liu L. 2007. The geochemical characteristics of radon and mercury in the soil gas of buried faults in the Hohhot district. *Earthquake*, 27(1): 70 – 76 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XC, Wang CY, Chai CZ, Si XY, Lei QY, Li Y, Xie C and Liu SC. 2011. The geochemical characteristics of soil gas in the southeastern part of Haiyuan fault. *Seismology and Geology*, 33(1): 123 – 132 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈顺云, 刘力强, 刘培洵, 马瑾, 陈国强. 2009. 应力应变与温度响应关系的理论与实验研究. *中国科学(D 辑)*, 39(10): 1446 – 1455
- 杜乐天. 2006. 地球的 5 个气圈与中地壳天然气开发. *天然气地球科学*, 17(1): 25 – 30, 35
- 樊祺诚, 隋建立, 孙谦, 李霓, 王团华. 2005. 天池火山千年大喷发的岩浆混合作用与喷发机制初步探讨. *岩石学报*, 21(6): 1703 – 1708
- 樊祺诚, 隋建立, 王团华, 李霓, 孙谦. 2006. 长白山天池火山粗面玄武岩的喷发历史与演化. *岩石学报*, 22(6): 1449 – 1457
- 樊祺诚, 隋建立, 李霓, 孙谦, 徐义刚. 2007. 长白山天池火山双岩浆房岩浆作用与互动式喷发. *矿物岩石地球化学通报*, 26(4): 315 – 318
- 郭广猛, 曹云刚, 龚建明. 2006. 使用 MODIS 和 MOPITT 卫星数据监测震前异常. *地球科学进展*, 21(7): 695 – 698
- 郭正府, 张茂亮, 孙玉涛, 成智慧, 张丽红, 刘嘉麒. 2015. 火山温室气体释放通量与观测的研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 34(4): 690 – 700

- 季灵运, 许建东, 林旭东, 栾鹏. 2009. 利用卫星热红外遥感技术监测长白山天池火山活动性. 地震地质, 31(4): 617–627
- 贾龙, 葛茂发, 徐永福, 杜林, 庄国顺, 王殿勋. 2006. 大气臭氧化学研究进展. 化学进展, 18(11): 1565–1574
- 金伯禄, 张希友. 1994. 长白山火山地质研究. 延吉: 东北朝鲜民族教育出版社, 1–223
- 李辉, 彭松柏, 乔卫涛, 林木森, 王振胜, 田礼乔. 2011. 根据多时相夜间 MODIS LST 推断的腾冲地区新生代火山岩岩浆囊分布与活动特征. 岩石学报, 27(10): 2873–2882
- 李克, 刘俊清, 盘晓东, 刘国明, 武成智, 郭峰. 2009. 2000–2007 年期间长白山天池火山区地壳变形监测与分析. 地震地质, 31(4): 639–646
- 李霓, 刘若新. 2000. 长白山天池火山全新世大喷发挥发性气体释放量的分析和估算. 岩石学报, 16(3): 357–361
- 李婷, 刘嘉麒, 王先彬, 郭正府, 郭文峰, 成智慧, 张茂亮. 2015. 长白山天池火山温泉的气体地球化学特征与成因. 矿物岩石地球化学通报, 34(6): 1192–1202
- 刘国明, 张恒荣, 孔庆军. 2006. 长白山天池火山区的地震活动特征分析. 地震地质, 28(3): 503–508
- 刘国明, 杨景奎, 王丽娟, 孙纪财. 2011. 长白山火山活动状态分析. 矿物岩石地球化学通报, 30(4): 393–399
- 刘嘉麒. 1999. 中国火山. 北京: 科学出版社, 1–193
- 刘嘉麒, 郭正府, 刘强. 1999. 火山灾害与监测. 第四纪研究, (5): 414–422
- 刘培洵, 刘力强, 陈顺云, 陈国强, 马瑾. 2004. 地表岩石变形引起热红外辐射的实验研究. 地震地质, 26(3): 502–511
- 刘若新, 李继泰, 魏海泉, 许东满, 郑祥身. 1992. 长白山天池火山——一座具潜在喷发危险的近代火山. 地球物理学报, 35(5): 661–665
- 刘煜, 周秀骥, 李维亮. 1990. 对流层臭氧的数值模拟试验. 应用气象学报, 1(1): 45–56
- 吕政, 杨清福, 张恒荣, 刘国明, 高金哲. 2007. 长白山天池火山地震活动与西北太平洋俯冲带内中深源地震关系的研究. 地震地质, 29(3): 470–479
- 仇根根, 裴发根, 胡慧, 杜炳锐, 张小博, 张鹏辉, 袁永真, 何梅兴, 白大为. 2014. 长白山天池火山岩浆系统分析. 地球物理学报, 57(10): 3466–3477
- 屈春燕, 单新建, 马瑾. 2006. 卫星热红外遥感在火山活动性监测中的应用. 地震地质, 28(1): 99–110
- 任雅琼, 陈顺云, 马瑾. 2012. 依兰-伊通断裂带地表温度变化分析. 地震学报, 34(5): 698–705
- 上官志冠, 武成智. 2008. 中国休眠火山区岩浆来源气体地球化学特征. 岩石学报, 24(11): 2638–2646
- 孙玉涛, 崔月菊, 刘永梅, 杜建国, 张伟斌, 张冠亚. 2014. 苏门答腊 2004、2005 年两次大地震前后 CO 和 O₃ 遥感信息. 遥感信息, 29(2): 49–55
- 汤吉, 赵国泽, 王继军, 詹艳, 邓前辉, 陈小斌. 2006. 基于地下电性结构探讨中国东北活动火山形成机制. 岩石学报, 22(6): 1503–1510
- 汪成民, 李宣瑚. 1991. 我国断层气测量在地震科学研究中的应用现状. 中国地震, 7(2): 19–30
- 王敏, 李强, 王凡, 张锐, 王阎昭, 师宏波, 张培震, 沈正康. 2011. 全球定位系统测定的 2011 年日本宫城 M_w9.0 级地震远场同震位移. 科学通报, 56(20): 1593–1596
- 杨理权, 邱金桓, 赵延亮. 1998. 火山气溶胶对北京地区臭氧总量变化趋势的影响. 大气科学, 22(5): 686–692
- 姚清林, 强祖基, 王弋平. 2005. 青藏高原地震前 CO 的排放与卫星热红外增温异常. 地球科学进展, 20(5): 505–510
- 周晓成, 郭文生, 杜建国, 王传远, 刘雷. 2007. 呼和浩特地区隐伏断层土壤气氦、汞地球化学特征. 地震, 27(1): 70–76
- 周晓成, 王传远, 柴炽章, 司学芸, 雷启云, 李营, 谢超, 刘胜昌. 2011. 海原断裂带东南段土壤气体地球化学特征. 地震地质, 33(1): 123–132