

苏门答腊两次 $M > 8.0$ 地震前后 CO 和 O_3 卫星遥感气体地球化学异常与地面验证*

孙玉涛¹, 崔月菊¹, 刘永梅², 杜建国¹, 张炜斌¹, 张冠亚¹

(1. 中国地震局地震预测重点实验室(中国地震局地震预测研究所), 北京 100036;

2. 内蒙古自治区地震局 西山咀地震台, 巴彦淖尔市乌拉特前旗 014400)

摘要: 利用印度尼西亚 Bukit Koto Tabang (BKT) 观测站的地面和大气红外探测仪(AIRS)卫星观测数据, 分别提取了该观测站 2004 年和 2005 年苏门答腊两次 $M > 8.0$ 地震前后地面和卫星观测所获得的 CO 总量、近地面(1 000 hPa)CO 体积分数和 O_3 总量的高光谱气体地球化学信息, 对 BKT 台站附近卫星观测数据和地面观测数据进行了相互验证。结果表明两次大地震前卫星和地面观测均捕获到了 CO 和 O_3 异常, 其中卫星观测获得的 CO 总量和 CO 体积分数与地面测得的 CO 浓度呈强正相关, 相关系数分别为 0.83 和 0.75, 表明 CO 浓度异常可能主要源于孕震过程中地下逸出的气体, 大气中的化学反应对 CO 异常的贡献次之。 O_3 卫星观测结果与地面观测结果也呈正相关关系($r=0.49$), 地震前 O_3 异常可能主要归因于地震前地下逸出的气体在大气中的化学反应。地面观测的 CO 和 O_3 浓度在两次地震前标准偏差变大, 且 CO 和 O_3 浓度变化与分别以地面观测站和地震震中为中心从卫星数据提取的气体浓度与地面观测数据变化趋势一致。研究结果丰富了利用高光谱卫星数据提取地震前后气体地球化学异常信息的方法。

关键词: 高光谱卫星遥感; 地球化学; 苏门答腊地震

中图分类号: P315.724

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)02-0222-06

0 前言

地球内部存在大量流体, 不断进行着排气作用。地球内部释放的气体主要有 CO_2 、CO、 CH_4 、 H_2S 、 H_2 、 N_2 、 O_2 、He、Ar 等。气体比液体运移速度快、穿透能力强, 对地震孕育的响应更为明显(King, 1986; 汪成民, 李宣璐, 1991; Du *et al.*, 2008)。众多学者应用卫星遥感技术发现了多个与地震有关的 CO、 O_3 等气体浓度异常, 如在 2000 年 6 月 6 日甘肃景泰 $M_s 5.9$ 地震、2000 年 6 月 8 日缅甸北部 $M_s 6.9$ 地震(姚清林等, 2005)、2002 年 3 月 31 日台湾 7.5 级地震(郭广猛等, 2006)、2010 年 4 月 4 日墨西哥下加利福尼亚 $M_w 7.2$ 地震(崔月菊等, 2011)、2001 年 1 月 26 日和 2006 年 3 月 7 日印度古吉拉特(Gujarat)地震

(Ganguly, 2011; Singh *et al.*, 2010a)、2002 年 11 月 3 日德纳里(Denali)断层地震(Singh *et al.*, 2007)、2010 年 1 月 12 日海地(Haiti)地震(Singh *et al.*, 2010b)中均发现了地震前后存在 CO 和 O_3 异常。

2004 年 12 月 26 日和 2005 年 3 月 28 日印度尼西亚苏门答腊地区发生了两次 $M > 8.0$ 地震, 两次大地震前后震中附近均发现 CO 和 O_3 气体地球化学异常(孙玉涛等, 2014)。笔者利用大气红外探测仪(Atmospheric Infrared Sounder, AIRS)数据, 提取了两次大地震前后全球大气本底观测系统(GAW)世界温室气体数据中心(WDCGG)位于印度尼西亚 Bukit Koto Tabang (BKT) 观测站附近的 CO 和 O_3 气体地球化学异常信息, 用 BKT 观测站的地面观测数据进行了验证, 并与以震中为中心利用卫星遥感数据提取的异常信息进行了对比。

* 收稿日期: 2013-07-08.

基金项目: 中国地震局地震预测重点实验室专项(0210240202, 30214240122, 40414600103)和中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目“首都圈地震重点监视区活动断裂带气体地球化学流动测量和地震应急”(02122408)联合资助.

1 数据与方法

1.1 数据

搭载于 Aqua 卫星平台上的高光谱分辨率传感器 AIRS 拥有 2 378 个连续的红外光谱通道 ($3.7 \sim 15.4 \mu\text{m}$) 以及 4 个可见光/近红外通道 ($0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$), 扫描带宽 1 650 km, 天底点空间分辨率 13.5 km, 总视场角 (FOV) $\pm 49.5^\circ$ (Won, 2008)。AIRS 数据可从美国国家航空航天局 (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。本文所使用的数据为 AIRS Level-3 月平均标准产品数据中的降轨数据。数据空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$, 采用 HDF 格式存储, 通过 MATLAB 软件直接读取。本文研究所用的 CO 和 O_3 月平均数据均来自印度尼西亚 BKT 观测站 (0.2°S , 100.32°E , 海拔 846.5 m) (图 1)。该观测站由印尼气象、气候和地球物理局 (Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics, BMKG) 建立。观测采用静止平台取样的观测方式, CO 测量方法为非分光红外 (NDIR) 方法, O_3 测量方法为紫外光吸收光谱分析方法 (UV) (<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/introduction.html>)。BKT 观测站位置及 2 次地震震中、研究区构造情况如图 1 所示。

1.2 方法

遥感温度异常与地震时空的关系以及地面流体研究结果表明, 地震前后气体异常一般分布在距震中几百到几千公里范围之内 (Qiang *et al.*,

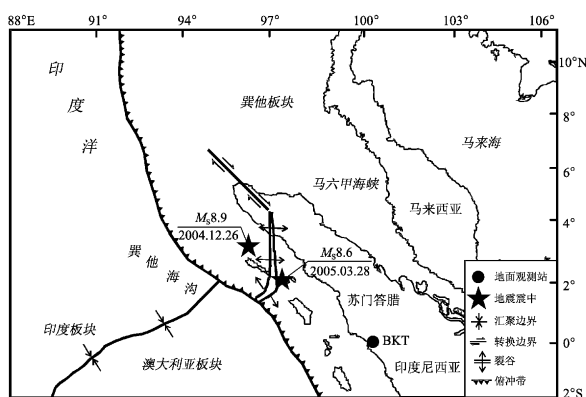


图 1 苏门答腊地震构造略图 (参考陶春辉等(2008))

Fig. 1 Tectonic sketch of Sumatra $M > 8.0$ earthquakes (based on Tao *et al.* (2008))

1997; Tronin, 2006), 异常时间一般在地震前后 6 个月内。BKT 观测站距 2004 年和 2005 年苏门答腊两次 $M > 8.0$ 地震的震中分别为 586 km 和 411 km (图 1)。为了进行遥感和地面观测对比, 本研究以 BKT 地面观测站为中心, 从 AIRS 标准产品数据中提取观测站附近 4 个像元 CO 月平均总量、近地面 CO 体积分数月平均值和 O_3 月平均总量作为卫星观测数值, 研究了两次大地震前后地面和卫星观测到的气体地球化学异常, 并将分别以观测站和震中为中心 CO 总量、CO 体积分数和 O_3 总量的卫星观测结果 (孙玉涛等, 2014) 与地面观测结果进行了对比。

选择 2004 ~ 2005 年作为研究的时间窗, 将 CO 和 O_3 含量打破多年变化规律或标准偏差明显增大均视为 CO 和 O_3 地球化学异常。

2 结果和讨论

地面观测的 CO 和 O_3 浓度在两次地震前打破变化规律出现升高且月平均值标准偏差在两次地震前变大 (图 2)。AIRS 高光谱遥感提取的以 BKT 观测站为中心的 CO 总量和 O_3 总量在两次地震前也都出现了升高 (图 3 ~ 5), 这与利用 AIRS 数据提取的震中附近 CO 总量和 O_3 总量变化趋势一致,

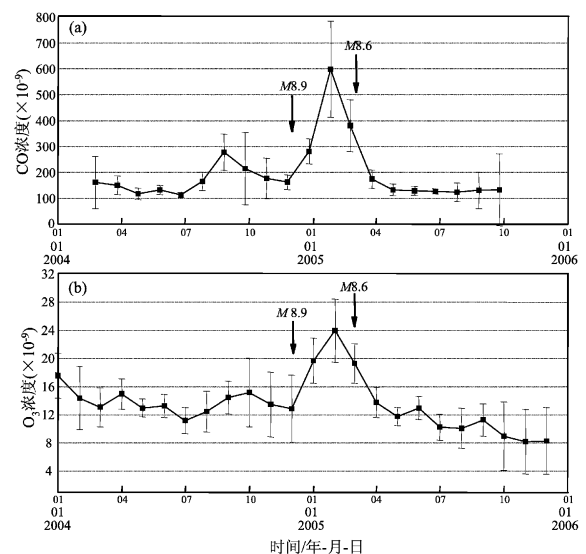


图 2 2004 ~ 2005 年在 BKT 观测的 CO 浓度和 O_3 浓度的月均值及标准偏差的变化

Fig. 2 Variations of monthly mean values and standard deviations of CO and O_3 concentrations measured at BKT observational station from 2004 to 2005

与地面观测的 CO 总量和 O₃ 总量变化趋势也是一致的。这主要与孕震过程中地应力作用下地下逸出的气体及其在大气中发生的化学反应有关 (Fishman *et al*, 1979, 1983; Yurganov *et al*, 1995; Varotsos *et al*, 2000; Kato *et al*, 2004; 崔月菊等, 2011; Cui *et al*, 2013)。标准偏差的增大说明数据的离散性增大, 即气体排放的时空不均一性增大。2004 年 2~3 月以及 2005 年 10~12 月 CO 和 O₃ 浓度的标准偏差增大可能与该地发生的其他地震有关。

2.1 CO 异常

如图 3、4 所示, 分别以观测站和震中为中心从 AIRS 数据提取的 CO 总量与地面观测结果呈强正相关, 相关系数分别为 0.83 和 0.86。分别以 BKT 观测站和震中为中心从 AIRS 数据提取的近地面 (1000 hPa) CO 体积分数与地面观测结果均为强正相关, 相关系数分别为 0.75 和 0.82。这表明地震前出现的 CO 异常可能主要来源于地面, 主要归因于地震孕育和发生过程中地下 CO 气体逸出量增加 (崔月菊等, 2011)。苏门答腊陆缘在东南亚的西缘 (图 1), 该区存在多条断裂, 构造和地震活动强烈 (陶春辉等, 2008)。孕震过程中, 在地应力作用下不仅使岩石产生了新的裂隙通道, 而且增大了地球内部气体的压力, 从而导致地球深部大量气体沿着断裂向地表逸散, 在震中及其附近地区形成了气体异常。

以观测站为中心从 AIRS 数据提取的近地表 (1000 hPa) CO 体积分数与地面观测数据之间的相关系数 (0.75) 低于以观测站为中心从 AIRS 数据提取的 CO 总量与地面观测数据之间的相关系数 (0.83), 表明除了地下气体逸散, 逸散的气体 (如 CH₄ 等) 在大气中发生化学反应也会生成 CO (式 1), 而逸出的气体在大气中的化学反应则是造成地震前 CO 异常的次要原因 (Fishman *et al*, 1979, 1983; Yurganov *et al*, 1995; Varotsos *et al*, 2000; Kato *et al*, 2004; 崔月菊等, 2011; Cui *et al*, 2013)。



苏门答腊两次大地震震前电离层电磁场和电离层等离子体参数存在变化 (Liu *et al*, 2011; Anagnostopoulos *et al*, 2012)。¹⁴N 在低频电磁辐射和电离层扰动下衰变形成 CO (Pandow *et al*, 1960;

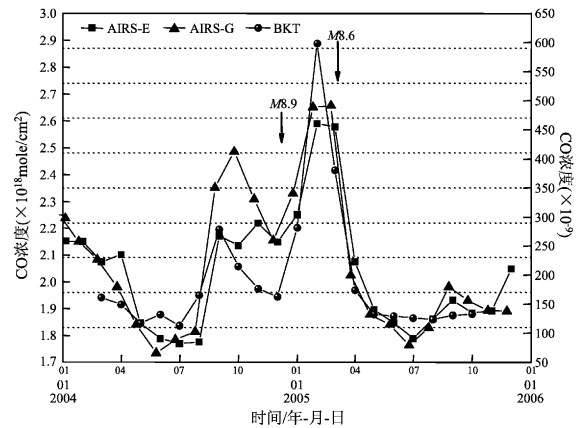


图 3 2004~2005 年在 BKT 观测的 CO 浓度的月均值与利用 AIRS 数据提取的 CO 月平均总量的变化 (AIRS-E 和 AIRS-G 分别表示以震中和观测站为中心利用 AIRS 数据提取的 CO 总量)

Fig. 3 Variations of monthly mean value of CO concentration measured at BKT observational station and monthly mean total column value of CO concentration abstracted from AIRS data from 2004 to 2005 (AIRS-E and AIRS-G represent total column of CO concentration abstracted from AIRS data by taking epicenter and ground observation station as center respectively)

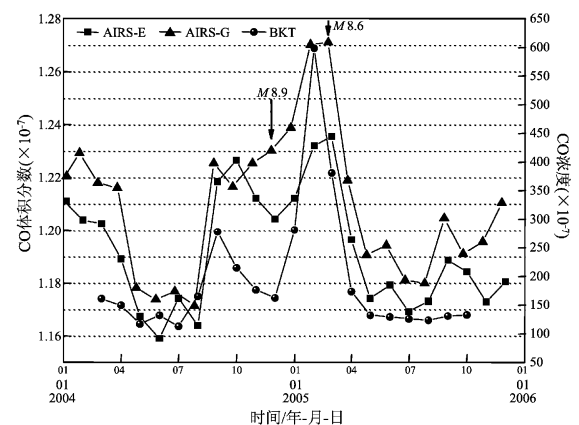


图 4 2004~2005 年在 BKT 观测的 CO 浓度月平均值与 1000 hPa CO 月平均体积分数的变化 (AIRS-E 和 AIRS-G 分别表示以震中和观测站为中心利用 AIRS 数据提取的 CO 体积分数)

Fig. 4 Variations of monthly mean value of CO concentration measured at BKT observational station and monthly mean volume fraction of CO concentration at 1000 hPa from 2004 to 2005 (AIRS-E and AIRS-G represent volume fraction of CO abstracted from AIRS data by taking epicenter and ground observation station as center respectively)

崔月菊等, 2011)。电离层状态的改变有利于¹⁴C的生成, 这也是导致 CO 总量升高的一个次要原因(式2)。



从 AIRS 数据分别提取的 CO 浓度、CO 体积分数在震中 (AIRS-E) 和观测站 (AIRS-G) 的变化趋势也是非常一致的, 相关系数分别为 0.94 和 0.72。这既表明利用卫星遥感数据提取的气体地球化学信息是可靠的, 也表明以震中距 500 km 的地面观测站为中心和以震中为中心获取的气体地球化学信息是等同的。

2.2 O₃ 异常

如图 5 所示, 分别以观测站和震中为中心利用 AIRS 数据提取的 O₃ 总量与地面观测的 O₃ 浓度呈正相关, 相关系数分别为 0.49 和 0.36。分别以观测站和震中为中心利用 AIRS 数据提取的 O₃ 总量与地面观测数据 O₃ 浓度的变化趋势一致, 这可能与地震前逸出的气体 (如 CO, CH₄ 等) 在大气中发生化学反应 (式 3) (Crutzen, 1974; Fishman *et al.*, 1979, 1983; Yurganov *et al.*, 1995; Vingarzan, 2004; Ganguly, 2011; 崔月菊等, 2011; Cui *et al.*, 2013)。分别以观测站和震中为中心卫星观测结果与地面观测结果在 2004 年 4~10 月略有不同, 这可能与平流层与中上对流层 O₃ 交换 (Lelieveld, Frank, 2000; Vingarzan, 2004; 杨健, 吕达仁, 2004) 以及 AIRS 传感器中对对流层的气体变化比较敏感有关。



从 AIRS 数据提取的 O₃ 总量在震中 (AIRS-E) 和观测站 (AIRS-G) 的变化趋势一致 ($r = 0.95$), 这表明以震中距 500 km 的地面观测站为中心和以震中为中心获取的气体地球化学信息是等同的。地面观测结果与以地面观测站为中心卫星观测的结果说明 O₃ 值的升高有地面的贡献, 也有一部分来自地下逸出的气体在大气中化学反应 (Crutzen, 1974; Fishman *et al.*, 1979, 1983; Yurganov *et al.*, 1995; Vingarzan, 2004; Ganguly, 2011; 崔月菊等, 2011; Cui *et al.*, 2013) 和平流层的注入 (Lelieveld, Frank, 2000; Vingarzan, 2004; 杨健, 吕达仁, 2004)。

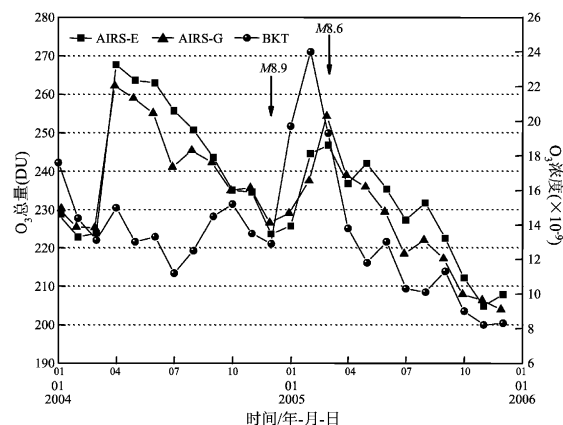


图 5 2004~2005 年在 BKT 观测的 O₃ 浓度月平均值与利用 AIRS 数据提取的 O₃ 月平均总量的变化 (AIRS-E 和 AIRS-G 分别表示以震中和观测站为中心利用 AIRS 数据提取的 O₃ 总量)

Fig. 5 Variations of monthly mean value of O₃ concentration measured at BKT observational station and monthly mean total value of O₃ concentration abstracted from AIRS data from 2004 to 2005

(AIRS-E and AIRS-G represent total value of O₃ concentration abstracted from AIRS data by taking epicenter and ground observation station as center respectively)

3 结论

利用 AIRS 高光谱遥感卫星数据提取的以 BKT 地面观测站为中心 (距震中约 500 km) 的卫星遥感数据以及 BKT 地面观测数据在两次 $M > 8.0$ 地震前出现了 CO 和 O₃ 的异常变化。以观测站为中心卫星观测获得的 CO 总量和 CO 体积分数与地面测得的 CO 浓度呈强正相关, 相关系数分别为 0.83 和 0.75。这表明 CO 浓度异常可能主要源于在孕震应力场作用下地下逸出的气体, 大气中的化学反应对 CO 异常的贡献次之。O₃ 卫星观测结果与地面观测结果也呈正相关关系 ($r = 0.49$), 这主要归因于地震前地下逸出气体在大气中的化学反应。

地面观测的 CO 和 O₃ 浓度在两次地震前标准偏差变大且在地震前打破多年变化而出现升高, 这与从 AIRS 数据提取的以台站为中心 CO 和 O₃ 的变化趋势是一致的, 也与从 AIRS 数据提取的以震中为中心 CO 和 O₃ 的变化趋势也是大体一致的。这表明在偏离震中几百公里范围内直接用卫星数据提取的地震前后气体地球化学异常信息是可靠

的, 偏离震中区也可以获得可信的信息。

实际应用中, 在地震发生后由于受气象等客观因素的影响, 尤其当震中区上方有云时, 在提取地震有关的气体地球化学信息时, 为了避免云层干扰, 可适当偏移地理坐标进行地震有关的气体地球化学异常信息提取, 从而更好地应用卫星遥感技术全天时观测的优势, 更好地发挥卫星遥感技术在防震减灾中的作用。

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 AIRS 高光谱分辨率卫星遥感数据; 全球大气本底观测系统 (GAW) 世界温室气体数据中心 (WDCGG) 为本次研究提供了地面气体观测数据, 在此一并感谢。

参考文献:

- 崔月菊, 杜建国, 周晓成, 等. 2011. 墨西哥下加利福尼亚 $M_w 7.2$ 地震前后 CO 遥感地球化学异常[J]. 矿物岩石地球化学通报, 30(4): 458 - 464.
- 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[J]. 地球科学进展, 21(7): 695 - 698.
- 陶春辉, 戴黎明, 孙耀, 等. 2008. 印尼附近海域地震海啸发生的构造背景综述[J]. 海洋学研究, 26(2): 59 - 66.
- 汪成民, 李宜瑚. 1991. 中国断层气测量在地震科学研究中的应用现状[J]. 中国地震, 7(2): 19 - 30.
- 杨健, 吕达仁. 2004. 东亚地区平流层、对流层交换对臭氧分布影响的模拟研究[J]. 大气科学, 28(4): 579 - 588.
- 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[J]. 地球科学进展, 20(5): 505 - 510.
- 孙玉涛, 崔月菊, 杜建国, 等. 2014. 苏门答腊 2004、2005 年两次大地震前后 CO 和 O₃ 遥感信息[J]. 遥感信息, 29(2): 49 - 55.
- Anagnostopoulos G. C., Vassiliadis E., Pulinetis S. 2012. Characteristics of flux-time profiles, temporal evolution, and spatial distribution of radiation-belt electron precipitation bursts in the upper ionosphere before great and giant earthquakes[J]. Annals of Geophysics, 55(1): 21 - 36.
- Crutzen P. J. 1974. Photochemical reactions initiated by and influencing ozone in unpolluted tropospheric air[J]. Tellus, 26: 47 - 57.
- Cui Y. J., Du J. G., Zhang D. H., et al. 2013. Anomalies of total column CO and O₃ associated with strong earthquakes in recent years[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 13: 1 - 7.
- Du J., Si X., Chen Y., et al. 2008. Geochemical anomalies connected with great earthquakes in China [A]//6Stefánsson. Geochemistry Research Advances [M]. New York: Nova Science Publishers, Inc. 57 - 92.
- Fishman J., Seiler W. 1983. Correlative nature of ozone and carbon monoxide in the troposphere: implications for the tropospheric ozone budget[J]. Journal of Geophysical Research, 88(C6): 3662 - 3670.
- Fishman J., Solomon S., Crutzen P. J. 1979. Observational and theoretical evidence in support of a significant in-situ photochemical source of tropospheric ozone[J]. Tellus, 31(5): 432 - 446.
- Ganguly N. D. 2011. The impact of transported ozone-rich air on the atmospheric ozone content following the 26 January 2001 and 7 March 2006 Gujarat earthquakes[J]. Remote Sensing Letters, 2(3): 195 - 202.
- Kato S., Kajii Y., Itokazu R. 2004. Transport of atmospheric carbon monoxide, ozone, and hydrocarbons from Chinese coast to Okinawa Island in the Western Pacific during winter[J]. Atmospheric Environment, 38(19): 2975 - 2981.
- King C. Y. 1986. Gas geochemistry applied to earthquake prediction: an overview[J]. Journal of Geophysical Research, 91(B12): 12269 - 12281.
- Lelieveld J., Frank J. D. 2000. What controls tropospheric ozone[J]. Journal of Geophysical Research, 105(D3): 3531 - 3551.
- Liu C., Liu J., Chen W., et al. 2011. An integrated study of anomalies observed before four major earthquakes: 2004 Sumatra $M_9.3$, 2006 Pingtung $M7.0$, 2007 Chuesu Oki $M6.8$, and 2008 Wenchuan $M8.0$ [J]. Journal of Asian Earth Science, 41(4-5): 401 - 409.
- Pandow M., Mackay C., Wolfgang R. 1960. The reaction of atomic carbon with oxygen: significance for the natural radio-carbon cycle[J]. Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry. 14(3-4): 153 - 158.
- Qiang Z. J., Xu X. D., Dian C. G. 1997. Thermal infrared anomaly precursor of impending earthquakes[J]. Pure and Applied Geophysics, 149(1): 159 - 171.
- Singh R. P., Cervone G., Singh V. P., et al. 2007. Generic precursors to coastal earthquakes: Inferences from Denali fault earthquake [J]. Tectonophysics, 431(1): 231 - 240.
- Singh R. P., Kumar J. S., Zlotnicki J., et al. 2010a. Satellite detection of carbon monoxide emission prior to the Gujarat earthquake of 26 January 2001[J]. Applied Geochemistry, 25(4): 580 - 585.
- Singh R. P., Mehdi W., Sharma M. 2010b. Complementary nature of surface and atmospheric parameters associated with Haiti earthquake of 12 January 2010[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 10(6): 1299 - 1305.
- Tronin A. A. 2006. Remote sensing and earthquakes: A review[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 31(4-9): 138 - 142.
- Varotsos C., Kondratyev K. Y., Efstathiou M. 2000. On the seasonal variation of the surface ozone in Athens, Greece[J]. Atmospheric Environment, 35(2): 315 - 320.
- Vingarzan N. D. 2004. A review of surface ozone background levels and trends[J]. Atmospheric Environment, 38(21): 3431 - 3442.
- Won Y. I. 2008. README Document for AIRS Level-3 Version 5 Standard Products; Daily (AIRH3STD, AIRX3STD, AIRS3STD) 8 - days (AIRH3ST8, AIRX3ST8, AIRS3ST8) & Monthly (AIRH3STM, AIRX3STM, AIRS3STM) [R]. Georgios Britzolakis.
- Yurganov L. N., Dzhol A. V., Grechko E. I. 1995. Carbon monoxide and total ozone in Arctic and Antarctic regions: seasonal variations, long-term trends and relationships[J]. The Science of Total Environment, 161: 831 - 840.

Anomalies Remote Sensing Geochemistry of CO and O₃ and Ground-based Validation before and after Two Sumatra $M > 8.0$ Earthquakes

SUN Yu-tao¹, CUI Yue-ju¹, LIU Yong-mei², DU Jian-guo¹, ZHANG Wei-bin¹, ZHANG Guan-ya¹

(1. CEA Key Laboratory of Earthquake Prediction (Earthquake Prediction Institute of
Earthquake Science, CEA), Beijing 100036, China)

(2. Xishanzui Seismic Station, Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region,
Urad Front Banner 014400, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract

Using the ground-based observation data recorded by Bukit Koto Tabang (BKT) observational station in Indonesian and observation satellite data by atmospheric infrared sounder (AIRS), the hyperspectral gas geochemical information of CO total column, CO volume mixing ratio at 1000 hPa and O₃ total column from ground-based and satellite data before and after two Sumatra $M > 8.0$ earthquakes were abstracted, and the ground-based and satellite data of BKT observational station were validated. The results show that the anomalies of CO and O₃ were both found before two Sumatra $M > 8.0$ earthquakes from ground-based and satellite data. Both CO total column and volume fraction at 1000 hPa from satellite data had significantly positive correlation with CO concentration from the ground-based data, and the correlation coefficient were 0.83 and 0.75 respectively, which indicated that the CO concentration anomalies was mainly attributed to degassing from the solid earth in the pregnant process and the secondary reason was chemical reactions in the atmosphere. The O₃ total column from AIRS data and O₃ concentration from ground-based data showed positive correlation with correlation coefficient 0.49, indicating the anomalies of O₃ mainly caused by chemical reactions of the degassed gases in the atmosphere. The standard deviations of CO and O₃ concentrations from ground-based data increased before two earthquakes, which was almost consistence with gas concentration abstracted from satellite data by taking the BKT station and epicenter as centre respectively and variation trends of ground-based observation data. The results widened the approach of extracting gaseous geochemistry information from hyperspectral satellite data especially.

Key words: hyperspectral remote-sensing; geochemistry; Sumatra $M > 8.0$ earthquake