

文章编号: 1001-8166(2011)07-0787-08

2010 年玉树 Ms 7.1 地震前后大气 物理化学遥感信息*

崔月菊¹, 杜建国¹, 陈志¹, 李静^{1,2}, 谢超¹, 周晓成¹, 刘雷¹

(1 中国地震局地震预测研究所地震流体研究室, 北京 100036

2 防灾科技学院地震科学系, 河北 燕郊 065201)

摘要: 利用高分辨率卫星遥感数据反演了地表温度、水汽、CO 总量和 CH₄ 体积分数的时空变化, 讨论了这种变化与 2010 年 4 月 14 日青海玉树 Ms 7.1 地震以及地震断裂带的关系。利用 MODIS LIB 数据反演的玉树地震前后的温度数据表明, 在主震前亮温和地表温度出现高值, 高值异常高于震前几年的同期平均温度并沿 NW 向断裂带分布; 这与测量的玉树地区气温在 3~4 月高于震前 10 年的同期平均温度的现象一致。利用 AIRS 数据提取的水汽总量、CO 总量和 CH₄ 体积分数数据表明, 水汽总量在主震后高于前 2 年平均值, CO 总量在地震前后也有升高变化。反演结果和地震地质资料表明在大地震前后的这些参数异常变化可能是地球深部物质运动和地下气体沿断裂带逸散引起的。研究结果表明利用高分辨率卫星遥感数据获取地表温度、湿度和大气微量组分含量的时空变化信息在地震监测、预测方面有很好的应用前景。

关键词: 卫星遥感; 地震; MODIS; AIRS 青海省玉树

中图分类号: P407; P315 **文献标志码:** A

1 引言

地震常发生在构造活动地段, 大地震常形成大规模的地表破裂带^[1, 2]。断裂带是固体地球内流体向大气圈逸出的有利通道。地下流体监测数据和近地表的断层土壤气调查都证明了在构造活动强烈期和大地震前后的活动断裂带会有大量气体 (Rn, Hg, H₂, CO₂, H₂O, He, CO, CH₄, H₂S, N₂, O₂ 等) 和热能释放到大气中, 地震活动可以增大地震断裂带气体的排放量^[3~10]。

地震前后携带着热能的地下气体沿断裂带排放到地表, 会引起地表温度、大气温度、长波辐射 (OLR)、相对湿度和气体组分含量等近地表大气物理化学参数的变化^[11~17]。因此, 这些参数变化不仅可以反映地一气交换过程, 而且也是预测地震活动

的重要依据。从卫星遥感数据提取地震前兆信息具有覆盖范围广、覆盖均匀、重复观测周期短、不受地面条件限制等优势。

利用高分辨率卫星遥感数据不仅可以反演亮温、大气温度、地表温度, 还可以反演一些气体组分 (H₂O, O₃, CO, CH₄, CO₂ 等) 含量等化学参数数据, 进而提取与地震有关的遥感信息。卫星遥感研究表明, 2001 年 1 月 26 日印度 Ms 7.8 Gujarat 地震前后出现水汽含量增高异常, 亮温和地表潜热通量也有明显的异常^[18]; 1985 年墨西哥 Michoacan 地震前后的热红外影像显示了一些地区的气温和水汽含量异常^[19]。大量热红外遥感研究结果表明, 温度异常主要出现在地震前两周到震后一周, 分布在距震中 500 ~ 1 000 km 的范围内, 且沿断裂带展布^[12, 14, 15, 20, 21]。CO 是大气的微量组分, 许多地震伴

① 收稿日期: 2011-01-12 修回日期: 2011-04-27

* 基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目 (玉树地震应急项目和一般项目) (编号: 02092436) 资助。

作者简介: 崔月菊 (1985-), 女, 河北鹿泉人, 硕士研究生, 主要从事遥感地球化学研究。E-mail: cychuicyuej@126.com

有 CO 异常, 如 2000 年 6 月 6 日甘肃景泰 Ms 5.9 地震和 2000 年 6 月 8 日缅甸北部 Ms 6.9 地震^[22]、2001 年 1 月 26 日印度 Gujara Ms 7.8 地震^[23]、2002 年 3 月 31 日台湾 Ms 7.5 地震^[24]前, 卫星遥感数据均显示了 CO 含量异常现象。

本文的目的是利用 MODIS 和 A RS 数据提取 2010 年玉树地震前后大气物理化学参数变化信息, 探讨这些遥感信息的成因机制及其与地震的内在关系。

2 地震地质

2010 年 4 月 14 日玉树 Ms 7.1 地震发生在青海省南部, 震中 (33°2′N, 96°6′E) 位于玉树断裂带。该地震使玉树—甘孜断裂带再次活动, 形成了长约 50 km 的地表破裂^[21]。玉树—甘孜断裂带形成于早华力西期, 为 NW 向大型走滑活动断裂, 西北段和东南段全新世以来活动强烈。1738 年以来发生过多次地震活动, 沿断裂带展布了很多地震裂缝、地震楔、地震鼓包及喷砂冒水等古地震遗迹^[25]。

3 数据与处理方法

3.1 MODIS 数据及处理方法

搭载于太阳同步极轨卫星 TERRA (地方时上午过境) 和 AQUA 卫星 (地方时下午过境) 上的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 有 36 个波段, 分布在 0.405 ~ 14.385 μm 光谱范围内, 有 3 种空间分辨率 (250、500 和 1 000 m), 每天可以获得昼夜各 2 次数据^[26]。MODIS 数据 (MODIS L1B, MOD03) 可在美国宇航局 (NASA) 戈达德航天中心 (GSFC) 分布式现役档案中心 DAAC (Distributed Active Archive Center) 网站获取。针对 MODIS L1B 数据利用水汽吸收波段 (17、18 和 19 波段) 与大气窗口 (2、5 波段) 结合地面反射率作比值得到波长为 λ 光波的透射率, 然后利用模拟的透射率和水汽含量之间的关系, 得到水汽含量信息^[27]; 针对 MODIS 数据 (31、32 波段) 估计星上亮温、地表比辐射率和大气透过率, 采用劈窗算法^[28]来反演地表温度。

3.2 A RS 数据及处理方法

大气红外探测仪 (A RS) 是搭载于 AQUA 卫星上的高光谱传感器, 在 3.7~4.61、6.2~8.2 和 8.8~15.4 mm 光谱范围内有 2 378 个波段, 光谱分辨率 $\Delta\lambda/\lambda=1/1\,200$, 近乎 1 天 2 次全球覆盖。A RS 结合先进的微波探测仪 (AMSU) 可以探测大气中的温度—湿度廓线、地表温度、水汽含量、O₃、CO、CH₄

和 CO₂ 信息等^[29]。数据可在 NASA 戈达德地球科学 (GES) 数据和信息服务中心 (DISC) 网站获取。所用数据为 A RS level 3 8- 天平均标准产品数据。该产品数据的空间分辨率为 1° × 1°, HDF (Hierarchical Data Format) 格式存储 (NASA 用于地球科学数据集存储的磁盘存储格式)^[30], 可用 MATLAB 软件直接读取。从标准产品数据中提取震中区一个像元 (约 100 km × 100 km) 的 CO 总量和 CH₄ 体积分数 (Volume Mixing Ratio, VMR), 分析其随时间的变化。

4 结果

4.1 亮温与地表温度

利用 MODIS 31 和 32 波段数据反演得到玉树地区亮温数据 (图 1, 左图), 然后用劈窗算法^[28]和 31、32 波段亮温数据计算得到地表温度数据 (图 1, 右图)。亮温和地表温度之间的相关系数 ($r > 0.99$) 表明二者高度相关, 但反演的地表温度与实测气温更接近。反演结果表明亮温和地表温度空间分布趋势一致, 其高值沿 NW 向断裂带分布, 地震前后其他时间 (无云时) 的亮温和地表温度分布也是如此。

4.2 气温变化

玉树地区 2000—2010 年 3、4 月每日最高温度统计结果表明, 2010 年 3 月 16 日之前, 2000—2009 年最高温度平均值与 2010 年最高温度呈现震荡现象; 2010 年 3 月 16 日~4 月 19 日, 玉树最高温度均高于同日的 10 年最高温度平均值, 仅在 3 月 29 日和 4 月 2 日、6 日、7 日低于历史同日最高温度平均值; 4 月 19 日之后 2010 年最高温度明显低于历史同日最高温度平均值 (图 2)。由 MODIS 数据反演的地表温度 (无云或少云的几天) 变化 (图 3), 显示的高值 (3 月 18 日、4 月 12 日、4 月 18 日左右) 和低值 (3 月 29 日、4 月 7 日左右) 的出现时间与气温变化基本吻合。

4.3 水汽总量

图 4 为由 A RS 数据得到的 2010 年水汽总量与前 2 年平均值的差值变化, 地震前水汽总量变化与前 2 年的变化趋势一致。震后开始, 水汽含量打破年变, 明显高于前 2 年, 且 8 天数据均值的离散性也增大; 这反映了水汽含量的时空变化加剧。但是, 利用 MODIS 数据反演的地震前后玉树地区的水汽含量看不出明显的空间分布特征。

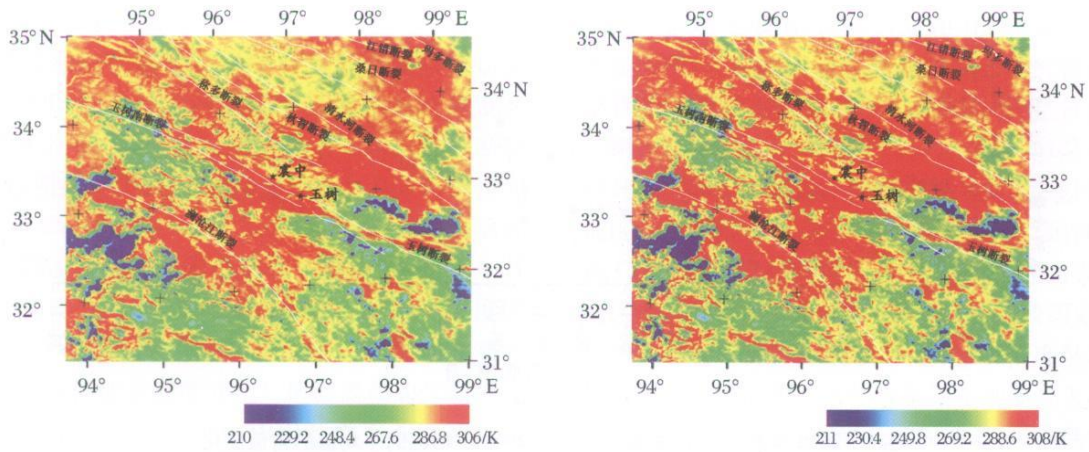


图 1 2010 年 3 月 18 日亮温与地表温度空间分布

Fig. 1 Distributions of brightness and temperature near the surface on 18 March 2010

左图为 32 波段亮温,右图为地表温度

left one is the distribution of brightness; right one is the distribution of temperature near the surface

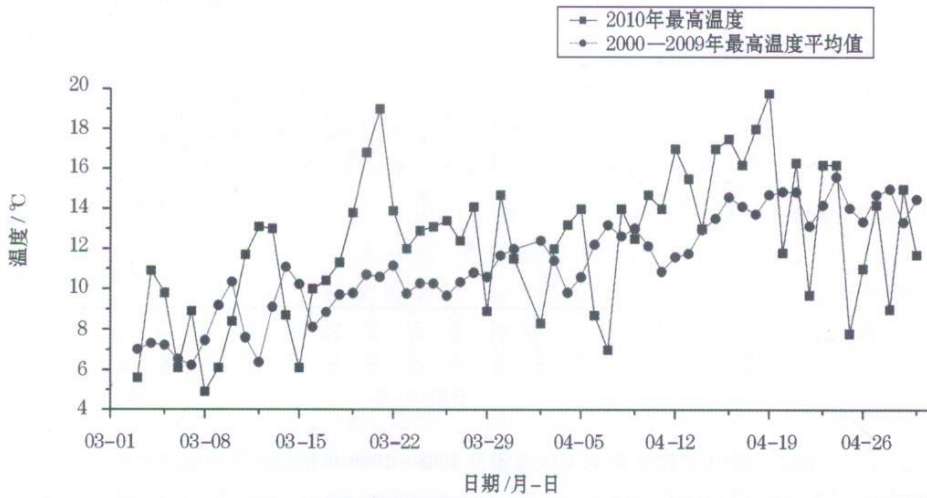


图 2 2010 年 3~4 月玉树实测日最高温度与历史同日最高温度平均值对比

Fig. 2 Comparison of the highest daily air temperature in March and April 2010 and the average of the highest daily air temperature measured at Yushu during 2000-2009

数据源于美国国家环境监测中心和英国国家气象中心共同使用的全球预报系统

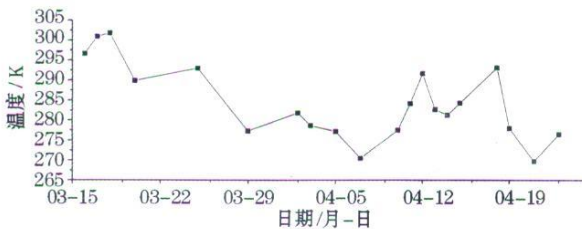


图 3 MODIS反演的 3~4 月玉树地震震中区地表温度变化

Fig. 3 Variations of the surface temperature retrieved from MODIS during March to April 2010

4.4 CO 总量

由 A IRS 降轨数据反演获得的 2010 年玉树地震震中区的 8 天平均 CO 总量及 2008—2009 年平均 8 天 CO 总量变化数据(图 5)显示 2010 年 CO 总量在震前 2 周和震后 2 周左右都出现极大值,且明显高于前 2 年对应的均值。

由 A IRS 降轨数据获得的 2010 年玉树地震震中区的 8 天平均 CH₄ 体积分数变化不明显,在标准偏差范围内。玉树地震震中区 CO₂ 体积分数在地震前 2 个月数据严重缺失,无法做时间序列变化。

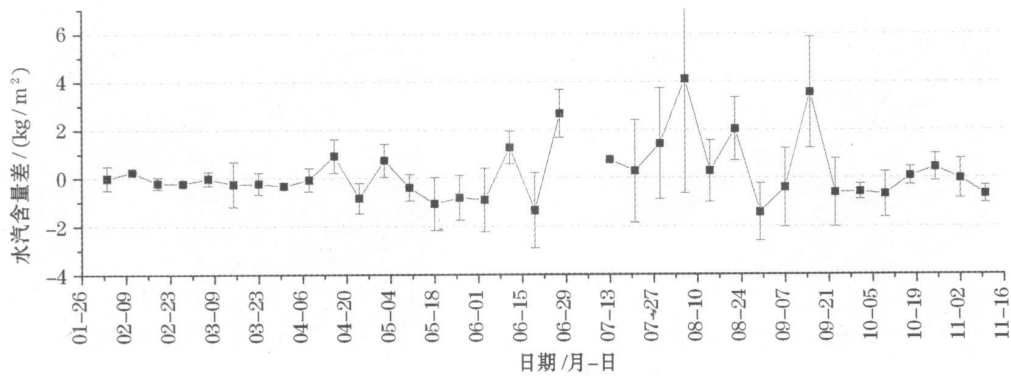


图 4 2010 年 8-天水汽总量与 2008—2009 年相应的平均值的差值变化

Fig. 4 Variations of differences between 8-days vapor total columns in 2010 and the corresponding mean values in 2008-2009

用 AIRS 降轨数据, 垂直线段表示标准偏差

From AIRS data in descending mode, the vertical bars stand for standard deviations

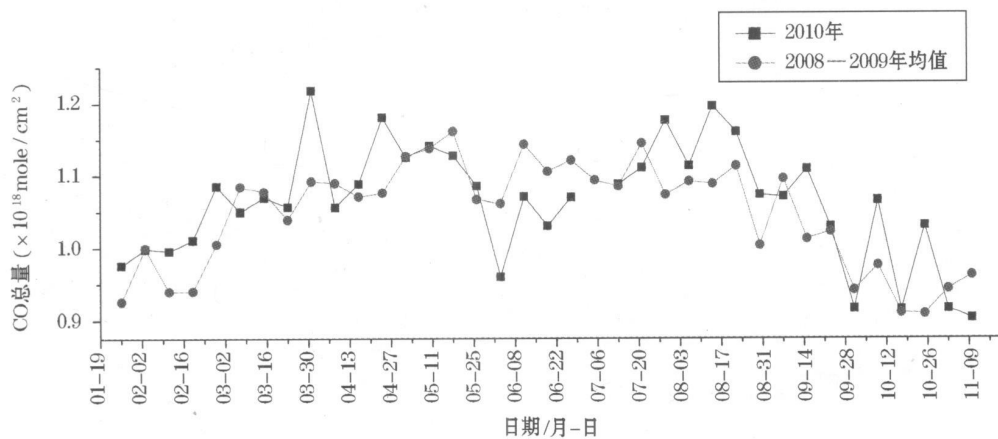


图 5 2010 年震中 8-天 CO 总量及 2008—2009 年相应的平均值的变化

Fig. 5 Variations of 8-days CO total column and the corresponding mean values in 2008-2009 at the epicenter area

5 讨论

5.1 异常变化与地震的关系

5.1.1 水汽变化与地震活动的关系

水汽变化与地震活动有密切关系。AIRS 获取的 2010 年水汽总量与前 2 年均值相比, 震前符合年变, 而在震后开始出现明显异常, 高于年变, 直到 9 月底异常消失。遥感数据反演的 2001 年 1 月 26 日 Gujarat 地震震中水汽含量在震前 3 天增高, 比周围地区高出近 2 倍, 震后消失^[18]。2008 年 5 月 12 日汶川地震前 11 天 (5 月 1 日) 大气水汽浓度突然增高, 是当年 4 月平均水平的近 2 倍, 是 2005—2007 年 5 月 1 日的 1.3~1.8 倍, 震后 1 周 (5 月 19 日) 异常消失^[31]。这些数据显示水汽高值异常出现的时段约在震前 3 天到震后 7 天。

5.1.2 CO 总量变化与地震活动的关系

在大地震前后观测到震中区及其附近有气体含量高值异常。玉树地震前后 CO 总量在震前约 3 周时突然升高, 震前 2 周达到极大值后开始急剧下降, 地震时降到最低, 震后又开始升高, 震后 2 周左右达到极大值, 且明显高于前 2 年对应的均值。2000 年甘肃景泰 Ms 5.9 地震和缅甸北部 Ms 6.9 地震前 (4 月 30 日) 青藏高原大面积 CO 逸出, 整个 CO 逸出区的 CO 含量为 2002 年正常值的 1.57~4.10 倍, CO 体积分数值异常区呈 EW 向分布^[22]。2001 年 Gujarat 地震前大气不同高度的 CO 含量明显升高, 震后急剧下降^[23]。2002 年 3 月 31 日台湾 Ms 7.5 地震前 1 天震中区附近 MOPITT 监测到圆形 CO 异常区^[24]。这些资料表明 CO 高值异常在震前 1 个月左右就开始出现。

5.1.3 温度变化与地震活动的关系

亮温和地表温度高异常与地震活动有密切关系。MODIS反演的玉树地区的亮温和地表温度高值沿 NW 向断裂带分布,特别是沿玉树—甘孜断裂更连续、明显。选取无云和少云的 8 天(2010 年 3 月 17 日、25 日,4 月 4 日、11~14 日、19 日)反演的玉树地震前后结古镇附近的地表温度表明,除 4 月 14 日、19 日外,其他几天结古镇附近的地表温度明显高于 2000—2009 年同期的反演的平均地表温度(表 1)。这种地表温度变化与地面测量的气温变化(图 2)是一致的。同样由 MODIS 数据获取的汶川地震的亮温数据在震前 12 天出现增温异常(增温 2~7 °C),异常幅度是震前的 1.4~2.0 倍,是 2005—2007 年的 1.2 倍^[31]。2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 Ms 8.1 地震前 6~7 天亮温增强,异常现象在空间分布上呈条带状,与震中区构造分布一致^[32]。1999 年台湾 ChiChi 地震在中国南海断裂带区出现 200 km 宽的热异常^[33]。

大地震一般伴有气温高值异常变化。玉树附近日最高气温从 3 月 16 日开始升高,一直持续到 4 月 19 日,长达 1 个月左右的气温高于历史均值。由 AMSU 数据获取的 2008 年 5 月 12 日汶川 Ms 8.0 地震前不同高度的大气温也发现有 5 K 高温异常^[17]。

5.2 地震遥感信息异常的形成机理

玉树地震前后的水汽总量、CO 含量、气温、亮温和地表温度的异常变化应该是导致玉树 Ms 7.1 地震发生的深部物质运动的不同表现形式。导致这些异常变化可能有如下几个方面的原因。

地震孕育过程中岩石受力破裂,地下深部流体上涌,大量的热水汽和其他温室气体等从地下逸出,使大气中水汽和地震气体含量(CO 等)增多。地下和地表温度升高,会加剧地下水蒸发、逸出,导致沿断裂带附近水汽含量明显增加^[31]。汶川地震后实地测量的断层土壤气(H₂, CO₂, Rn 和 Hg)含量变化与区域应力场和余震活动性的变化有关^[10]。

在延怀盆地土壤 H₂, CO₂, Rn 和 Hg 气体地球化学测量表明,在地震活动性较强的东部区气体地球化学背景场明显高于西部^[9]。虽然本研究只发现了玉树地震前后 CO 含量弱的异常变化,但是并不排除其他气体没有异常。地震发生在不同地区,不同地区的地质地球化学和气象特征不同。因此,未发现 CH₄和 CO₂含量异常可能受控于多种因素,如研究区地下逸散的 CH₄没有明显增量、气象因素干扰、传感器对这 2 种气体的敏感度、反演精度低和 CO₂的背景含量较高等。水汽含量增多现象在玉树地震震后开始出现,而在震前未发现增多,可能是由于地震前地壳表层没有被破坏,大气中水蒸汽含量比其他微量组分(CO, CH₄)的含量高,所以增加的微量水蒸汽在遥感数据中未能显示出明显异常。然而,玉树地震震后沿宽约 2 km 的地震断裂带地表出现破裂,地下挥发份向大气逸散量增大,引起震后水汽含量增多。

温室气体逸出地表后在瞬变电场和太阳辐射的作用下导致地表热异常。许多观测资料表明,地震地表热异常一般与气体异常出现在相同时空范围^[22~24]。如台湾 Ms 7.5 地震前 MODIS 获取的温度高异常与 MOPITT 监测到 CO 异常一致^[24], Gujarat 地震前温度与大气 CO 含量异常并存^[23],都充分证明是地球排气作用(地下 CO 气体沿岩石受力产生微裂隙逸出)导致了温度异常,验证了气—热震兆。汶川 Ms 8.0 地震前不同高度的大气温异常变化也很可能与震中区地下逸出的温室气体有关^[17]。卢振权等^[34]在探索南海临震前卫星热红外增温异常的原因时,总结多个研究实例推知,临震前地球排气作用释放的异常气体是卫星热红外增温异常的直接原因。

震前地应力变化使岩石挤压、断层摩擦产生的能量和地下热等被裂隙流体溢出、气体逸出和岩石自身的热传导带出地表,也会产生热异常。地下深部流体沿破裂带上涌,会促进地下积累的能量、地下气体和地下热等沿破裂带向大气中排放,加快热量

表 1 玉树结古镇地区反演的 2010 年 3~4 月地表温度与历史同期日平均地表温度 (单位: K)

Table 1 Values of retrieved daily surface temperature in March to April 2010 and the corresponding daily mean value in 2000-2009 in the Jiegu region, Yushu (unit K)

日期	3月 17日	3月 25日	4月 4日	4月 11日	4月 12日	4月 13日	4月 14日	4月 19日
2010年地表温度	301	293	298	284	292	283	281	278
2000—2009年平均地表温度	274	278	271	272	284	277	288	285

交换,使断裂带附近出现热异常。1999年台湾 Chi-Chi地震 200 km 宽的热异常正是由于地下深部流体上涌,把地下热量带到近地表,加快热量交换造成地表升温^[33]。

因为地震过程的复杂性以及地球内部压力释放强度不同,所以地下气体释放量、释放时间和持续时间都不相同,每个地震引起的大气物理化学参数及其变化特征都各不相同。

6 结 论

利用 MODIS LIB 数据反演了玉树地震前后的亮温、地表温度和水汽含量的空间分布信息,亮温和地表温度高值沿 NW 向断裂带分布。利用 AIRS 数据提取了地表温度、近地表大气温度、水汽总量、CO 总量、CH₄体积分数的变化信息,2010年震后水汽总量出现异常,CO 总量在地震前后也有一些高值变化。此外,气象站测量的大气温度表明玉树地震前 4周到震后 5天温度呈升高趋势,明显高于 2000—2009年 10年的同期平均温度。这些参数的变化很可能是孕育地震的应力场变化引起地下排气增大造成的。显然,利用卫星遥感数据获取与地震有关的大气物理化学参数变化对地震监测和预测有重要意义。然而,要获取更多可靠的地震前兆信息还有待获取更高分辨率遥感数据和更深入的研究。

致谢: 感谢陈正位副研究员提供玉树地区的地震地质资料,感谢董彦芳副研究员指导使用 ENV I 软件,感谢中国科学院遥感应用研究所陈良富研究员和张莹博士在 AIRS 数据处理分析时给予的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Fu B, Awata Y, Du J *et al*. Complex geometry and segmentation of the surface rupture associated with the 14 November 2001 great Kunlun earthquake, northern Tibet, China [J]. *Tectonophysics*, 2005, 407: 43-63
- [2] Chen Zhengwei, Yang Panxin, Li Zhimin *et al*. Characteristics of M_s 7.1 Yushu earthquake fault and surface rupture [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(3): 625-629 [陈正位, 杨攀新, 李智敏, 等. 玉树 7.1 级地震断裂特征与地震地表破裂带 [J]. 第四纪研究, 2010, 30(3): 625-629.]
- [3] Wang Chenglin, Li Xuanhu. Applications of fracture-gas measurement to the earthquake studies in China [J]. *Earthquake Research in China*, 1991, 7(2): 19-30 [汪成林, 李宣瑚. 我国断层气测量在地震科学研究中的应用现状 [J]. 中国地震, 1991, 7(2): 19-30.]
- [4] Qiang Zuji, Du Letian. Earth degassing, forest fire and seismic activities [J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(2): 236-245 [强祖基, 杜乐天. 地球排气与森林火灾和地震活动 [J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 236-245.]
- [5] Weinlich FH, Faber E, Boušková A, *et al*. Seismically induced variations in Mariánské Lázně fault gas composition in the NW Bohemian swan-quake region, Czech Republic—A continuous gas monitoring [J]. *Tectonophysics*, 2006, 421(1/2): 89-110
- [6] Dogan T, Mori T, Tsunomori *et al*. Soil H₂ and CO₂ surveys at several active faults in Japan [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, 164: 2449-2463
- [7] Du J, Si X, Chen Y, *et al*. Geochemical anomalies connected with great earthquakes in China [C] // Steffansson Ó. *Geochemistry Research Advances*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2008: 57-92
- [8] Wala V, Yang T F, Hong W L, *et al*. Geochemical variation of soil gas composition for fault trace and earthquake precursory studies along the Hsincheng fault in NW Taiwan [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, 67: 1855-1863
- [9] Li Ying, Du Jianguo, Wang Fukuan *et al*. Geochemical characteristics of soil gas in Yanqing-Huailai Basin, North China [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2009, 31(1): 82-91 [李莹, 杜建国, 王富宽, 等. 延怀盆地土壤气体地球化学特征 [J]. 地震学报, 2009, 31(1): 82-91.]
- [10] Zhou X, Du J, Chen Z, *et al*. Geochemistry of soil gas in the seismic fault zone produced by the Wenchuan M_s 8.0 earthquake, southwestern China [J]. *Geochemical Transactions*, 2010, 11(5), doi: 10.1186/1467-4866-11-5
- [11] Tronin A A. Satellite thermal survey—A new tool for the studies of seismically active regions [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(8): 1439-1455
- [12] Tronin A A, Bigip P F, Molchanov O A, *et al*. Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, 29(4/9): 501-506
- [13] Tronin A A. Remote sensing and earthquakes: A review [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, 31(4/9): 138-142
- [14] Qiang Z, Xu X, Dian C. Thermal infrared anomaly precursors of impending earthquakes [J]. *Pure Applied Geophysics*, 1997, 149: 159-171
- [15] Qiang Z, Lin C, Li L, *et al*. A telluric thermal infrared brightness temperature anomaly image—Short-term and impending earthquake precursors [J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 42(3): 313-324
- [16] Liu Defu, Kang Chunli. Radiation anomaly before Sumatra Island M_s 7 earthquake [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2005, 313(1): 37-39 [刘德富, 康春丽. 苏门答腊岛 8.7 级大地震前的辐射异常现象 [J]. 国际地震动态, 2005, 313(1): 37-39.]
- [17] Singh R P, Mehdi W, Gautam R, *et al*. Precursory signals using satellite and ground data associated with the Wenchuan earthquake of 12 May 2008 [J]. *International Journal of Remote Sensing*

- ing, 2010 31(13): 3341-3354
- [18] Dey S, Sarkar S, Singh R P. Anomalous changes in column water vapor after Gujarat earthquake [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(3): 274-278.
- [19] Pulinet S, Dunajek M. Specific variations of air temperature and relative humidity around the time of Michoacan earthquake M 8. 1 Sept 19, 1985 as a possible indicator of interaction between tectonic plates [J]. *Tectonophysics*, 2007, 431(1/4): 221-230.
- [20] Tronin A A, Hayakawa M, Molchanov O A. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China [J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, 33: 519-534
- [21] Ouzounov D, Liu D F, Kang C L, et al. Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes [J]. *Tectonophysics*, 2007, 431: 211-220
- [22] Yao Qinglin, Qiang Zujie, Wang Yiping. CO release from the Tibetan Plateau before earthquake and increasing temperature anomaly showing in thermal infrared images of satellite [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(5): 505-510 [姚清林, 强祖基, 王弋平. 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*, 2005, 20(5): 505-510.]
- [23] Singh R P, Kumar S J, Zbortnicki J, et al. Satellite detection of carbon monoxide emission prior to the Gujarat earthquake of 26 January 2001 [J]. *Applied Geodesy*, 2010, 25: 580-585.
- [24] Guo Guangeng, Cao Yungang, Gong Jiaming. Monitoring anomaly before earthquake with MODIS and MOPITT data [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 2(7): 695-698 [郭广猛, 曹云刚, 龚建明. 使用 MODIS 和 MOPITT 卫星数据监测震前异常 [J]. *地球科学进展*, 2006, 2(7): 695-698.]
- [25] Zhou Rongjun, Wen Xueze, Cai Changxing, et al. Recent earthquakes and assessment of seismic tendency on the Ganzhi-Yushu fault zone [J]. *Seismology and Geology*, 1997, 19(2): 115-124. [周荣军, 闻学泽, 蔡长星, 等. 甘孜—玉树断裂带的近代地震与未来地震趋势估计 [J]. *地震地质*, 1997, 19(2): 115-124.]
- [26] Liu Fang, Cheng Wanzheng, Ran Maonong. A new data source of satellite thermal infrared remote sensing information: EOS MODIS data [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2003, 8: 1-6. [刘放, 程万正, 冉茂农. 一种新的卫星热红外遥感信息数据源: EOS MODIS 数据 [J]. *国际地震动态*, 2003, 8: 1-6.]
- [27] Kaufman Y J, Gao B C. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS MODIS [J]. *IEEE Transactions on Remote Sensing*, 1992, 30(5): 871-884
- [28] Mao Kebiao. A Study of Methods for Land Surface Temperature Retrieval from MODIS Data [D]. Nanjing: Nanjing University, 2004. [毛克彪. 用于 MODIS 数据的地表温度反演方法研究 [D]. 南京: 南京大学, 2004.]
- [29] Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products and processing system [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41: 253-264
- [30] Won Y-I. README Document for AIRS Level 3 Version 5 Standard Products Daily (AIRH3STD, AIRX3STD, AIRS3STD) 8-days (AIRH3ST8, AIRX3ST8, AIRS3ST8) & Monthly (AIRH3SIM, AIRX3SIM, AIRS3SIM) [R]. Georgios Bratislakis, 2008.
- [31] Cui Lihua. Study on Anomaly of Remote Sensing Information and Mechanism before the Wenchuan Earthquake [D]. Tangshan: Hebei Polytechnic University, 2009. [崔丽华. 汶川地震前的遥感信息异常及其机理研究 [D]. 唐山: 河北理工大学, 2009.]
- [32] Kang Chunli, Chen Zhengwei, Chen Lize, et al. Analysis on the satellite infrared anomaly feature before west to Kunlun Mountain pass M 8. 1 earthquake [J]. *Northwest Seismological Journal*, 2003, 25(1): 12-15 [康春丽, 陈正位, 陈立泽, 等. 昆仑山口西 8. 1 级地震的卫星热红外前兆特征分析 [J]. *西北地震学报*, 2003, 25(1): 12-15.]
- [33] Chen H, Panell J, Gong Z. Large-scale seismic thermal anomaly linked to hot fluid expulsion from a deep aquifer [J]. *Journal of Geophysical Exploration*, 2006, 89(1/3): 53-56.
- [34] Lu Zhenquan, Qiang Zujie, Wu Bihao. A tentative interpretation of the formation of high temperature anomaly in Satellite-based Thermal Infrared Scanning Images (STISI) of the South China Sea before earthquake [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(1): 42-46 [卢振权, 强祖基, 吴必豪. 南海临震前卫星热红外增温异常原因初探 [J]. *地球学报*, 2002, 23(1): 42-46.]

Remote Sensing Signals of Atmospheric Physics and Chemistry Related to 2010 Yushu Ms 7.1 Earthquake

Cui Yueju¹, Du Jianguo¹, Chen Zhi¹, Li Jing^{1,2},
Xie Chao¹, Zhou Xiaocheng¹, Liu Lei¹

(1 *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China;*

2 *Institute of Disaster Prevention, Yanjiao 065201, China*)

Abstract The temporal and spatial variations of surface temperature, vapor total column, CO₂ total column and CH₄ volume mixing ratio were retrieved by high-resolution satellite remote sensing data. The relationships between these variations and 14 April 2010 Yushu Ms 7.1 earthquake in Qinghai Province, Northwest China and seismic ruptures were discussed. Brightness and surface temperature retrieved using MODIS L1B data associated with Yushu Earthquake shows that the values of brightness and surface temperature were higher along the NW fault zones than in the un-faulted areas before the main shock; the higher values of surface temperature were larger than the corresponding daily mean values of ten years before, which is similar to the phenomena that measured values of air temperature before the Yushu Earthquake were higher than the corresponding daily average of last ten years. Vapor total column, CO₂ total column and CH₄ volume mixing ratio retrieved using AIRS shows that the values of vapor total column were higher than the average of last two years after the main event and CO₂ total column also increased before and after the earthquake. Our results indicated that the variations associated with large earthquake maybe caused by the movement of deeper earth material and degassing along faults during earthquake generation, which can be applied into monitoring and prediction of earthquake.

Key words Satellite remote sensing; Earthquake; MODIS; AIRS; Yushu in Qinghai province