

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

崔月菊, 杜建国, 周晓成, 陈 志, 李 营, 刘 雷, 谢 超, 张炜斌

中国地震局 地震预测研究所, 北京 100036

摘 要: 利用 AIRS 产品数据提取了 2010 年 4 月 4 日墨西哥下加利福尼亚 M_w 7.2 地震前后震中及其附近 CO 总量和 CO 体积混合比随时间变化的信息, 并讨论了 CO 气体地球化学变化与地震活动的关系。数据表明, 下加利福尼亚地震前约一个月 CO 总量升高, 高出前两年同期平均值 $2\sim 4\times 10^{17}$ mole/cm², 在地震发生前后 CO 总量和近地表 CO 体积混合比有波动现象, 且 8 日平均数据的标准偏差增大, 约为非地震时段的 2 倍。该现象应该归因于地震孕育发生过程中地应力作用使岩石圈脱气增强、大气电磁和化学反应引起的 CO 含量的增加。研究结果表明利用卫星高光谱遥感数据提取与地震有关的 CO 气体地球化学信息, 对地震监测预报有重要意义。

关 键 词: 遥感; 地球化学; 地震; AIRS; CO; 下加利福尼亚

中图分类号: P593 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2011)04-0458-07

Geochemical Anomaly of CO Remote Sensing Associated with Baja California M_w 7.2 Earthquake in Mexico

CUI Yue-ju, DU Jian-guo, ZHOU Xiao-cheng, CHEN Zhi, LI Ying, LIU Lei,
XIE Chao, ZHANG Wei-bin

Institute of Earthquake Science China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract: The variations of CO total column and the mixing ratio of CO volume over time in epicenter and vicinity area of Baja California M_w 7.2 earthquake (April 4th 2010, Mexico) were extracted from AIRS database; the geochemical variations of CO and earthquake activities were carefully correlated. The extracted data showed that CO total column, one month before the earthquake, increased and was higher than the corresponding mean values ($2\sim 4\times 10^{17}$ mole/cm²) of 2008~2009; CO total column and CO volume mixing ratio (near-surface) fluctuated and the standard deviations of 8-day average before and after the earthquake increased to as high as about 2 times of the non-seismic period. These phenomena were attributed to increasing gas leakage from the lithosphere, a result of the earthquake related stress and increasing photo-chemical reactions in the atmosphere, a result of variation of atmospheric electromagnetism related to the earthquake. The results indicate that geochemical information of CO obtained by satellite hyperspectral remote sensing can be connected with earthquake, indicating potential application in monitoring and forecasting earthquake.

Key words: remote sensing; geochemistry; earthquake; AIRS; CO; Baja California

在构造活动强烈期和大地震前后的活动断裂带会有大量地下气体(Rn、Hg、CO₂、CH₄、CO、H₂O、He、H₂、O₂等)向上逸出到大气中,引起大气中气体组分和浓度的变化^[1~4]。

根据卫星传感器在不同光谱频带上的观测辐射量和气体所固有的光谱吸收特征^[5],可推求吸收气体的分布,实现利用卫星高光谱遥感技术进行大气成分探测^[6]。卫星遥感技术早已用于地震监测研

究^[7]和油气勘探^[8]等领域。近年来,利用卫星高光谱技术进行大气探测已经广泛应用于全球变化^[9]、大气环境监测^[10]、火山探测^[11]等领域。

目前,卫星高光谱技术在地震监测方面的研究处在起步阶段。尽管传感器的空间分辨率和灵敏度还比较低,遥感对气体监测受到大气干扰较大,但是发现了一些与地震有关的 CO、水汽和 O₃ 异常,且气体异常和热红外增温异常有密切的联系。如 2000 年 6 月 6 日甘肃景泰 M_s 5.9 地震和 6 月 8 日缅甸北部 M_s 6.9 地震^[12]、2001 年 1 月 26 日印度 Gujarat M_s 7.8 地震^[13]、2002 年台湾 3 月 31 日 7.5 级地震^[14]前,卫星遥感数据均显示了 CO 含量异常现象,且气体异常与热红外异常吻合。此外,1985 年墨西哥 Michoacan 地震^[15]、2001 年 1 月 26 日印度 M_s 7.8 Gujarat 地震^[16]和 2008 年 5 月 12 日汶川地震^[17]前后水汽含量出现增高异常,Gujarat 地震还引起了 O₃ 浓度异常^[18]。目前,气体地球化学异常的成因机制复杂,岩石圈脱气可能是引起大气圈化学成分变化的主要因素^[12~18]。

本文利用大气红外探测仪 AIRS Level-3 标准产品数据提取了墨西哥下加利福尼亚 M_w 7.2 地震前后的 CO 总量和体积混合比(volume mixing ratio, VMR)数据,分析了这些数据的变化特征,探讨了 CO 总量和体积混合比与地震活动的关系及其异常形成机理。

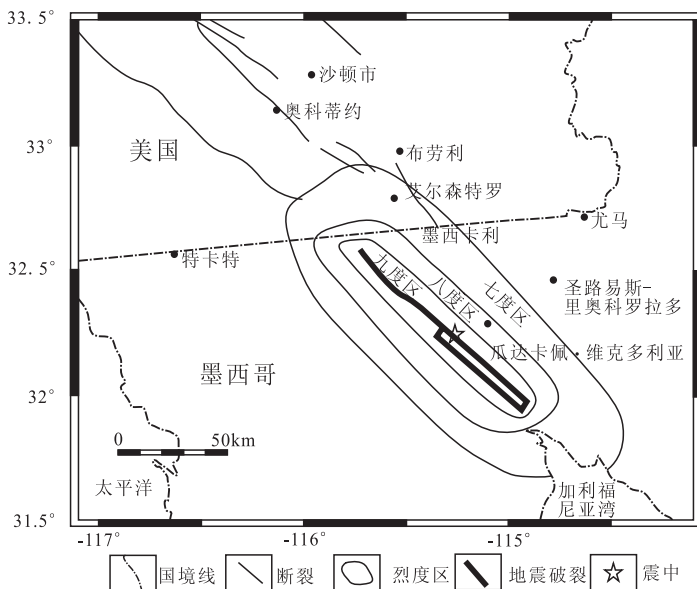
1 地震地质概况

2010 年 4 月 4 日发生在墨西哥下加利福尼亚南部的 M_w 7.2 地震,震中位置(32.259°N, 115.287°W)位于东太平洋隆起的北部,圣安德烈斯断裂带的南端。圣安德烈斯断裂呈北北西走向,长达 1287 km,切割深度超过 18 km,连接胡安德富卡扩张中心与加利福尼亚扩张中心,是太平洋板块和北美板块的重要界线,其主断裂是转换断层,具有明显的右旋走向滑动性质。从卡洪山口起到加利福尼亚湾为圣安德烈斯断裂的南段,出现平行排列的断裂群和局部网状构造,是地震高发区,但未发生过 8 级以上地震^[19]。此次地震是 1892 年以来该地区震级最大的地震,加利福尼亚南部、亚利桑那州、内华达州和墨西哥下加利福尼亚都有震感,在震中两侧产生了约 75 km 的北西向破裂带(图 1)。

2 数据和方法

2002 年发射的大气红外探测仪(AIRS)是搭载于 AQUA 卫星上的高光谱分辨率大气探测仪器,在 3.7~15.4 mm 光谱覆盖范围内有 2378 个波段,光谱分辨率 $\Delta\lambda/\lambda = 1/1200$,红外波段空间分辨率为 13.5 km,轨道重复周期为 16 天,全球 80% 的地区可以实现一天两次覆盖^[20,21]。AIRS 有 36 个 CO 探测通道,其 CO 反演所用波段为 4.50~4.58 mm (2183~2220 cm⁻¹)光谱范围内的 CO 1-0 垂直-旋转波段^[9]。当前反演准则是通过改变地球物理状态^[20],最小化晴空辐射观测资料和前向模型估算的辐射量之间的加权差值,反演精度为 15%^[22]。每组地球物理状态的变化由地球物理扰动参数和梯形扰动函数确定^[20]。

本文采用 AIRS level-3 的 8 天(AIRX3ST8)和月平均标准产品数据(AIRX3STM),多天产品是对应格网的日平均数据的简单算术平均值,而日均值产品是由对应二级产品数据(数据空间分辨率 45 km、时间分辨率基本上是一天两次)网格化得到的。该数据空间分辨率为 1×1 度,采用标准数据格式 HDF-EOS (Hierarchical Data Format) 存储,HDF-EOS 是 NASA 用于地球科学数据集存储的磁盘存储格式。该数据不仅包括 CO 相关信息,还包含了温度、湿度、水汽、O₃、CH₄ 等信息以及各数据的标准偏差。AIRS 产品数据可在 NASA 戈达德地球科学(GES)数据和信息服务中心(DISC)免费下载



<http://www.scsn.org/2010sierraelmayor.html>

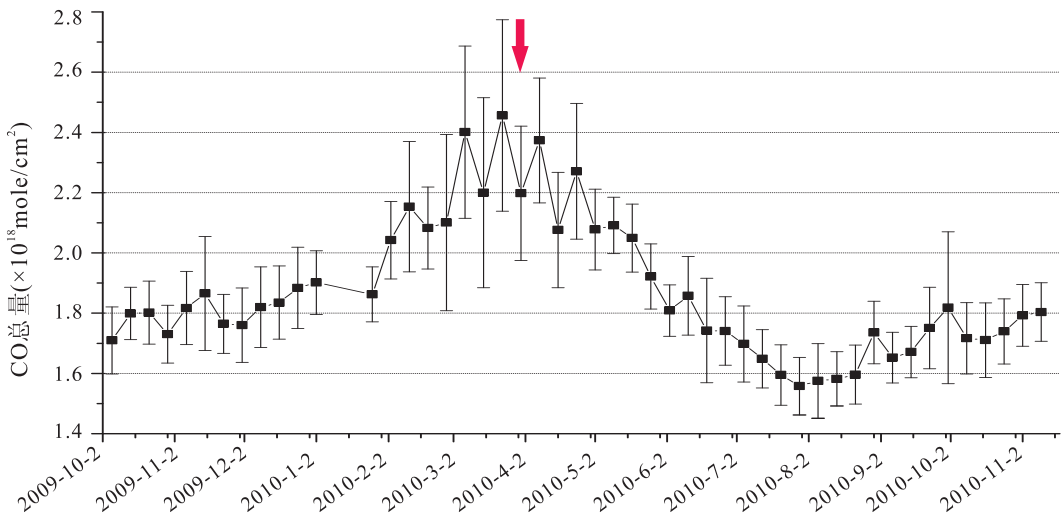
图 1 2010 年 4 月 4 日下加利福尼亚地震震中位置及烈度
Fig. 1 Intensity and epicenter location of Baja California M_w 7.2 earthquake in April 4 2010

(<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/data-holdings>)^[21]。利用 Matlab 软件编程提取地震前后震中区的 CO 总量、CO 体积混合比、CH₄ 体积混合比、CO₂ 体积混合比、H₂O 总量和 O₃ 总量及其标准偏差数据,由于传感器对 CO₂、CH₄ 敏感度不够高,气体背景值较大、受影响因素较多等原因造成难以获取由地震引起的 CH₄、CO₂ 和 H₂O 的相对变化,故只分析了 CO 的变化特征及其与地震的关系。

3 结 果

由 AIRS 降轨数据反演获得的 2010 年下加利福尼亚地震震中区的 8 天平均 CO 总量及其标准偏差变化数据显示 CO 总量在下加利福尼亚地震前 2 个月到震后 1 个月左右持续呈现波动的高值,标准

偏差增大,约是 2010 年其它时段的 2 倍(图 2)。分析前几年(2006~2009)CO 总量的月变化数据发现虽然 CO 总量在 2~5 月有升高现象,但是在地震发生前 3 月份震中区的 CO 总量明显高于往年同期,高出前 4 年同期的平均值 2.0583×10^{17} mole/cm² (表 1)。特别是在 2011 年 2~4 月份 8 天平均 CO 总量持续三个月高于前两年同期 CO 均值,最高达 $2 \sim 4 \times 10^{17}$ mole/cm²,5 月开始基本持平,恢复正常周期变化(图 3)。此外,CO 含量增加会导致对流层 O₃ 的增多,CO + 2O₂ → CO₂ + O₃^[23],因此利用 O₃ 的变化也可以佐证 CO 增加。在下加利福尼亚地震震中区发现 2010 年 5 月前 O₃ 总量明显高于前两年均值(图 4),证明了下加利福尼亚地震前 CO 总量增多。



用 AIRS 降轨数据,垂直线段表示标准偏差,红色箭头表示地震发生时间。

From AIRS data in descending mode, the vertical bars show standard deviations, red arrow shows the happening time of the earthquake.

图 2 震中 8 天 CO 总量及其标准偏差变化

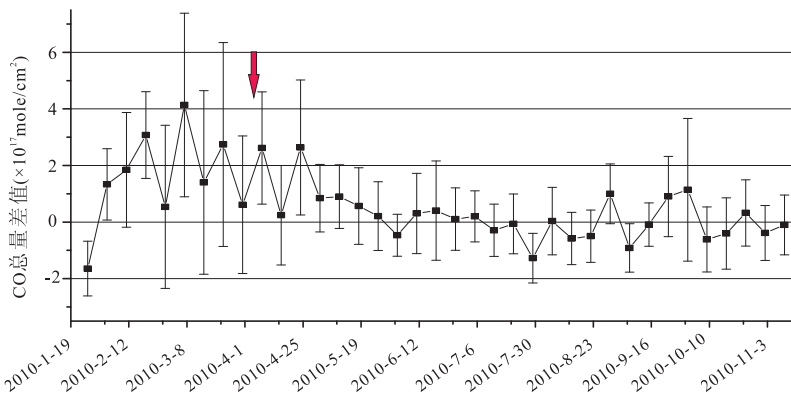
Fig. 2 Variations of 8-days CO total column and standard deviations at the epicenter area

表 1 2006~2010 年月平均 CO 总量

Table 1 The CO total column in monthly from 2006 to 2010

mole/cm²

月份	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2010 年—平均
1	1.9494E+18	1.9358E+18	1.9628E+18	1.7717E+18	1.8661E+18	-3.8825E+16
2	1.8639E+18	2.0656E+18	1.9245E+18	1.8989E+18	2.0713E+18	1.3308E+17
3	2.0666E+18	2.1506E+18	2.0213E+18	2.0406E+18	2.2756E+18	2.0583E+17
4	2.0947E+18	2.3342E+18	2.0833E+18	2.1485E+18	2.2470E+18	8.1825E+16
5	2.0009E+18	2.1239E+18	2.0444E+18	1.9376E+18	2.0390E+18	1.2300E+16
6	1.8565E+18	1.8548E+18	1.7981E+18	1.8108E+18	1.8107E+18	-1.9350E+16
7	1.7394E+18	1.7213E+18	1.7152E+18	1.6331E+18	1.6438E+18	-5.8450E+16
8	1.5820E+18	1.6579E+18	1.6476E+18	1.6241E+18	1.5920E+18	-3.5900E+16
9	1.6582E+18	1.6770E+18	1.6458E+18	1.7062E+18	1.6934E+18	2.1600E+16
10	1.7791E+18	1.7816E+18	1.7043E+18	1.7492E+18	1.7390E+18	-1.4550E+16
11	1.8818E+18	1.7746E+18	1.7718E+18	1.7940E+18	1.8091E+18	3.5500E+15
12	1.8926E+18	1.8685E+18	1.7582E+18	1.8310E+18	1.8104E+18	-2.7175E+16

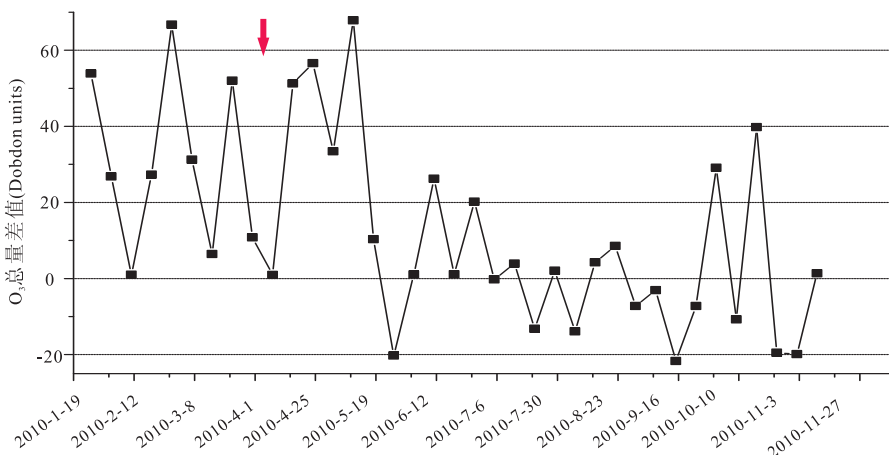


用 AIRS 降轨数据, 垂直线段表示 2010 年 CO 总量标准偏差, 红色箭头表示地震发生时间

From AIRS data in descending mode, the vertical bars show standard deviations, red arrow shows the happening time of the earthquake.

图 3 2010 年 8 天 CO 总量与 2008~2009 年相应的平均值的差值变化

Fig. 3 The 8 day averaged CO total columns of 2010 and the corresponding mean values of 2008-2009

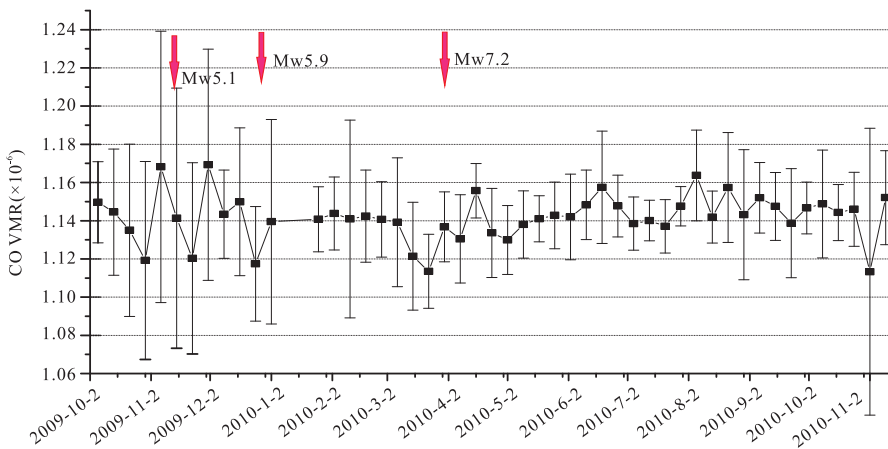


用 AIRS 降轨数据, 红色箭头表示地震发生时间

From AIRS data in descending mode, red arrow shows the happening time of the earthquake

图 4 2010 年 8 天 O₃ 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 O₃ total columns in 2010 and the corresponding mean values in 2008-2009



垂直线段表示标准偏差, 红色箭头表示地震发生时间

the vertical bars show standard deviations, the red arrow shows the happening time of the earthquake

图 5 用 AIRS 降轨数据得出的震中 8 天近地表 CO 的 VMR 值及其标准偏差变化

Fig. 5 The 8 day averaged CO VMR values and standard deviations (near the surface at the epicenter area) calculate from AIRS data in descending mode

近地表(约 1000 hPa)CO 的 VMR 值及其标准偏差数据(图 5)显示,VMR 值在 2010 年之前波动和标准偏差较大,对应了 2009 年的 10 月 1 日、3 日,11 月 16 日,12 月 30 日相继发生了 4 次 5 级以上地震;而在下加利福尼亚地震前后有小的波动,其它时间基本没有变化。尽管高空和中对流层 CO 的浓度不同,但是地震前后震中区中对流层的 CO 的 VMR 值变化明显、趋势基本一致。近地表(850 和 1000 hPa)CO 的 VMR 值变化不明显,这与传感器中对流层的气体比较敏感有关。然而在 3 月 15 日左右近地表(1000 hPa)CO 的 VMR 值突然升高,出现极大值,其它高度层 CO 的 VMR 值随后增大(图 6),这说明 CO 总量的增加是近地表的贡献。

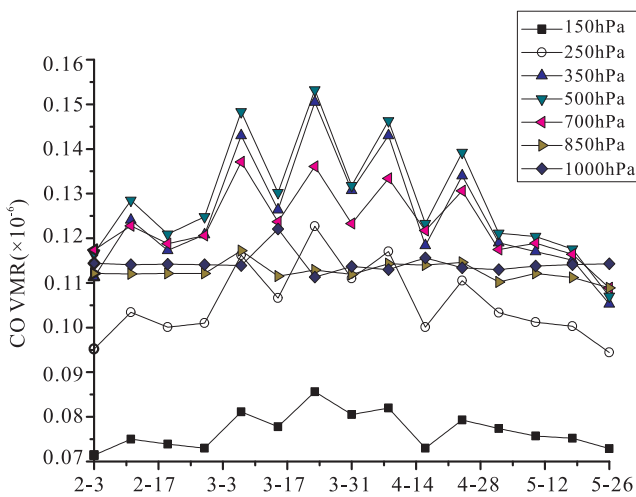


图 6 下加利福尼亚地震前后震中区不同高度的 CO 的 VMR 值变化

Fig. 6 Variations of CO VMR at different levels over the epicenter, before and after Baja California earthquake

下加利福尼亚地震前后 CO 总量升高、近地表 CO 的 VMR 值的波动以及标准偏差的变化与地震的发生有密切的关系。

4 讨 论

4.1 大气中 CO 的背景含量及其来源

从卫星遥感数据提取的大气 CO 总量由两个部分构成:大气 CO 背景含量和地下 CO 逸散与大气化学反应形成的 CO 增量。多年的大气 CO 总量平均值反映了大气的 CO 背景含量,大气对流层中 CO 的背景含量为 1.4×10^{-6} 。大气中 CO 主要有两类来源:一是自然来源,如对流层的光化学反应形成的 CO($\text{CH}_4 + 4\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{O}_2$ [24,25]; $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p}) \rightarrow ^{14}\text{C}, 2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ [25])、火山喷发、森林火灾等形成的 CO;二是人类活动(化石燃料的燃烧、

农作物秸秆燃烧和甘蔗的加热提纯)对 CO 总量的贡献。CO 最终被氧化为 CO_2 或者被生物有机体消耗,在大气中保留时间为 0.1 年 [24]。

4.2 异常形成的原因

CO 含量偏离该地区的背景值或者打破其多年变化规律均视为 CO 异常。下加利福尼亚地震前后的 CO 总量升高、CO 的 VMR 值波动及其标准偏差增大都属于 CO 异常现象。大震前的这些 CO 异常应该是岩石圈-大气圈综合作用的结果,其形成机制是多元的。

首先,观测到的下加利福尼亚地震前后 CO 总量和 VMR 值异常变化主要归因于地震孕育区域地下 CO 气体排量的增加。地震是地球内部应力释放的一种形式,在地震孕育过程中岩石受力形成微破裂、改变地壳岩石的渗透率,地球内部的气体在地球内部压力的作用下向外释放到大气中,引起地震区 CO、 CH_4 、 CO_2 、 H_2O 等含量升高 [1~4]。由地下排气量增加引起的类似的 CO 异常的震例也有报道。2000 年 4 月 30 日青藏高原大面积 CO 逸出(CO 含量为 2002 年正常值的 1.57 ~ 4.10 倍,异常呈不规则环状分布)的原因很可能与 2000 年 6 月 6 日甘肃景泰 M_s 5.9 地震和 6 月 8 日缅甸北部 M_s 6.9 地震孕育有关 [12],CO 异常是地震前地下岩石受力产生裂隙,隐藏在地层中的气体逸出地表引起的。2002 年 3 月 31 日台湾 M_s 7.5 地震前 1 天震中区附近 MOPITT 监测到的圆形 CO 含量异常也可能是地下 CO 气体逸出所致 [14]。2001 年 Gujarat 地震前大气不同高程的 CO 浓度异常也可能是地震前地应力集中对震中区的水文地质边界产生影响使得地下气体排放造成的 [13]。

地球是地质、地球物理和地球化学的复杂体,不同地震的构造和地下结构各不相同,而且地震是一个复杂的过程,地球内部气体的释放方式由于地球内部压力释放强度不同也不相同 [26],导致地下气体释放量、释放时间和持续时间都不相同,从而使得地震前后震中区 CO 总量(图 2)和 VMR 发生波动(图 5),异常幅度与地震震级不是线性变化关系。因此,大震(2010 年 4 月 4 日)引起的 CO 的 VMR 波动不一定比小震(2009 年 11 月 16 日,12 月 30 日)引起的波动小(图 5),8 天平均 CO 总量(图 2)和 VMR 数据(图 5)的标准偏差(反映的是震中位置多个像元 8 天数据的波动即离散度)增大。

其次,大气中 CH_4 被氧化成 CO_2 和 H_2O 的过程中会形成过度产物——CO。地下 CH_4 排放量增

加,并进入大气与 OH 反应形成 CO,使 CO 总量增大。地球脱气作用使震中区 CH₄、H₂O 含量升高,当羟基分子浓度大于 2.3×10⁶ mole/cm³ 时发生光化学反应^[24],CH₄ 和 OH 反应生成 CH₃,CH₃ 经过一系列转化形成 CO,总反应式为:CH₄+4O₂→CO+H₂+H₂O+2O₂^[23,24],导致 CO 含量增多。

再者,低频电磁辐射和电离层扰动促进¹⁴N 衰变成 CO。地震前由于岩石压电效应、压磁效应和感应电磁效应等各种地震电磁效应的作用,电离层中 ULF、ELF、VLF、LF 电磁场和电磁波辐射增强,等离子体(电子、离子)密度、高能粒子(质子、电子)通量增大等化学、物理参数的异常变化^[27,28],有利于¹⁴C 的生成量的增加,导致 CO 浓度增加。反应机制是 n+¹⁴N→¹⁴C+H,2¹⁴C+O₂→2¹⁴CO^[25]。

5 结 语

利用卫星高光谱数据提取墨西哥下加利福尼亚地震前后 CO 总量和体积混合比数据,发现 CO 气体地球化学异常与地震活动有密切关系。

(1)研究区在下加利福尼亚地震前后出现了 CO 异常,异常开始出现的时间在震前两个月左右,异常持续时间约 3 个月,异常表现为 CO 体积混合比波动,8 天 CO 总量平均值(高出前两年同期平均值约 2~4×10¹⁷ mole/cm²)和体积混合比数据的标准偏差(约是其它时间段的 2 倍)增大,即震中及其附近地区不同地点和不同时间地下气体逸出增量的变化。

(2)观测到的 CO 异常现象与下加利福尼亚 M_w7.2 地震有密切的关系。CO 异常可能主要归因于地震孕育发生过程中地应力变化、岩石受力产生裂隙使得地下气体逸出,其次是在大气中化学反应生成 CO,是岩石圈-大气圈综合作用的结果。

(3)研究结果表明利用高分辨率卫星遥感数据提取 CO 地球化学信息在地震监测和预测方面有广阔的应用前景。

由于目前卫星高光谱数据的空间、时间分辨率还不够高,对一些气体的敏感度比较低,因此难以监测到其它更多与地震有关的气体地球化学异常信息。随着空间遥感技术的发展,卫星传感器的分辨率不断提高、识别能力不断加强,可以获取更精确的气体遥感数据,从而提取出更多地震前后气体地球化学信息。

参考文献 (References):

[1] 汪成民,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.

Wang Chengmin, Li Xuanhu. Applications of fracture gas measurement to the earthquake studies in China[J]. Earthquake Research in China, 1991, 7(2): 19-30. (in Chinese with English abstract)

- [2] Du J, Si X, Chen Y, Fu H, Jian C, Guo W. Geochemical anomalies connected with great earthquakes in China [A]. óStefánsson. Geochemistry research advances [M]. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2008, 57-92.
- [3] Walia V, Yang T F, Hong W L, Lin S J, Fu C C, Wen K L, Chen C H. Geochemical variation of soil-gas composition for fault trace and earthquake precursory studies along the Hsin-cheng fault in NW Taiwan [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2009, 67: 1855-1863.
- [4] Zhou X, Du J, Chen Z, Cheng J, Tang Y, Yang L, Xie C, Cui Y, Liu L, Yi L, Yang P, Li Y. Geochemistry of soil gas in the seismic fault zone produced by the Wenchuan Ms 8.0 earthquake, southwestern China [J]. Geochemical Transactions, 2010, 11(5), doi:10.1186/1467-4866-11-5.
- [5] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, ChrisBenner D, Bernath P F, Birk M, Boudon V, Brown L R, Campargue A, Champion J P, Chance K, Coudert L H, Dana V, Devi V M, Fally S, Flaud J M, Gamache R R, Goldman A, Jacquemart D, Kleiner I, Lacombe N, Lafferty W J, Mandin J Y, Massie S T, Mikhailenko S N, Miller C E, Moazzen A N, Naumenko O V, Nikitin A V, Orphal J, Perevalov V I, Perrin A, Predoi C A, Rinsland C P, Rotger M, imeková M, Smith M A H, Sung K, Tashkun S A, Tennyson J, Toth R A, Vandaele A C, Vander A J. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer, 2009, 110: 533-572.
- [6] Gottwald M, Bovensmann H, Lichtenberg G, Noel S, Von Barga A, Slijkhuis S, Piter A, Hoogeveen R, Von Savigny C, Buchwitz M, Kokhanovsky A, Richter A, Rozanov A, Holzer P T, Bramstedt K, Lambert J C, Skupin J, Wittrock F, Schrijver H, Burrows J P. SCIAMACHY, Monitoring the Changing Earth's Atmosphere [M]. German: DLR Electronic Library, 2006.
- [7] 康春丽,陈正位,陈立泽,田勤俭,刘德富.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.
Kang Chunli, Chen Zhengwei, Chen Lize, Tian Qinjian, Liu Defu. Analysis on the satellite infrared anomaly feature before west to Kunlun mountain pass M8.1 Earthquake[J]. North-western Seismological Journal, 2003, 25(1): 12-15. (in Chinese with English abstract)
- [8] 傅碧宏,丑晓伟.塔里木盆地东南缘石油遥感地质的综合分析与评价[J].新疆石油地质,1997,18(2):108-113.
Fu Bihong, Chou Xiaowei. Evaluation and comprehensive analysis of remote sensing for petroleum geology in the South-eastern part of Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1997, 18(2): 108-113. (in Chinese with English abstract)
- [9] McMillan W W, Barnett C, Strow L, Chahine M, Warner J,

- McCourt M, Novelli P, Korontzi S, Maddy E, Datta S. Daily global maps of carbon monoxide from NASA's Atmospheric Infrared Sounder[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L11801, doi:10.1029/2004GL021821.
- [10] Frankenberg C, Platt U, Wagner T. Retrieval of CO from SCIAMACHY onboard ENVISAT: detection of strongly polluted areas and seasonal patterns in global CO abundances[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2004, 4: 8425—8438.
- [11] Loyola D, van Geffen J, Valks P, Erbetseder T, Van R M, Thomas W, Zimmer W, Wißkirchen K. Satellite-based detection of volcanic sulphur dioxide from recent eruptions in Central and South America[J]. *Advances in Geosciences*, 2008, 14: 35—40.
- [12] 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.
Yao Qinglin, Qiang Zuji, 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. (in Chinese with English abstract)
- [13] Singh R P, Kumar S J, Zlotnicki J, Kafatos M K. Satellite detection of Carbon monoxide emission prior to the Gujarat earthquake of 26 January 2001[J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25: 580—585.
- [14] 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.
Guo Guangmeng, Cao Yungang, Gong Jianming. Monitoring anomaly before earthquake with MODIS and MOPITT data[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 2(7): 695—698. (in Chinese with English abstract)
- [15] Pulinet S, Dunajacka 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.
- [16] 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.
- [17] 崔丽华. 汶川地震前的遥感信息异常及其机理研究[D]. 石家庄: 河北理工大学, 2009.
Cui Lihua. Study on anomaly of remote sensing information and mechanism before the Wenchuan earthquake [D]. Shijiazhuang: Hebei Polytechnic University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [18] Tronin A A, Hayakawa M, Molchanov O A. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China[J]. *Geodynamics*, 2002, 33: 519—534.
- [19] Fialko Y. Interseismic strain accumulation and the earthquake potential on the southern San Andreas fault system [J]. *Nature*, 2006, 441: 968—971.
- [20] Susskind J, Barnett C D, Blaisdell J M. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds[J]. *IEEE Transaction Geoscience Remote Sensing*, 2003, 41: 390—409.
- [21] Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, Goldberg M D, Kalnay E, Mcmillin L M, Revercomb H, Rosenkranz P W, Smith W L, Staelin D H, Strow L L, Susskind J. 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.
- [22] Strow L, Hannon S, Machado S, Motteler H, Tobin D. An overview of the AIRS radiative transfer model[J]. *IEEE Transaction Geoscience Remote Sensing*, 2003, 41, 303—313.
- [23] Fishman J, Solomon S, Crutzen P J. Observational and theoretical evidence in support of a significant in-situ photochemical source of tropospheric ozone[J]. *Tellus*, 1979, 31: 432—446.
- [24] Weinstock B, Niki H. Carbon Monoxide Balance in Nature [J]. *Science*, 1972, 176 (32): 290—292.
- [25] Pandow M, MacKay C, Wolfgang R. The reaction of atomic carbon with oxygen: Significance for the natural radio-carbon cycle[J]. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 1960, 14(3—4): 153—158.
- [26] 郑乐平. 温室气体 CO₂ 的另一源——地球内部[J]. *环境科学研究*, 1998, 11(2): 21—24.
Zheng Leping. Another source of greenhouse gas CO₂: The earth's interior [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1998, 11(2): 21—24. (in Chinese with English abstract)
- [27] 丁鉴海, 申旭辉, 潘威炎, 张晶, 余素荣, 李纲, 关华平. 地震电磁前兆研究进展[J]. *电波科学学报*, 2006, 21(5): 791—801.
Ding Jianhai, Shen Xuhui, Pan Weiyan, Zhang Jing, Yu Suyong, Li Gang, Guan Huaping. Seismo-electromagnetism precursor research progress [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21(5): 791—801. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张学民, 刘静, 钱家栋, 申旭辉, 蔡晋安, 欧阳新艳, 赵庶凡. 西藏改则 6.9 级地震前的电离层电磁扰动[J]. *地震*, 2008, 28(3): 14—22.
Zhang Xuemin, Liu Jing, Qian Jiadong, Shen Xuhui, Cai Jinnan, Ouyang Xinyan, Zhao Shufan. Ionospheric electromagnetic disturbance before Gaize earthquake with MS 6.9, Tibet[J]. *Earthquake*, 2008, 28(3): 14—22. (in Chinese with English abstract)