

丁志华,崔月菊,唐杰,2022. 2020年7月12日唐山5.1级地震前高光谱多参数异常特征分析. 中国地震,38(3):494~502.

2020年7月12日唐山5.1级地震前 高光谱多参数异常特征分析

丁志华¹⁾ 崔月菊²⁾ 唐杰¹⁾

1)河北省地震局,石家庄 050021

2)中国地震局地震预测研究所,地震预测重点实验室,北京 100036

摘要 基于高光谱遥感数据,通过RST算法提取2020年7月12日唐山5.1级地震前不同参数异常信息,发现震前CH₄、CO、H₂O、O₃均出现了高值异常,且异常均位于震中附近,异常幅度高于2倍均方差,CH₄、CO、H₂O异常机理不同于O₃。通过统计2018—2020年CH₄、CO、H₂O三种气体出现频次,发现同步异常具有可靠性,认为高光谱多参数异常出现的同步性,可提高异常性质判定的信度。通过对不同参数进行连续跟踪观测,提取多参数同步异常信息,对地震短临预报具有一定参考意义。

关键词: 高光谱 多参数 异常提取 RST算法

[文章编号] 1001-4683(2022)03-0494-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

前人对地震地下流体进行了诸多探索,传统地下流体以定点前兆为主,包括水位、水温、水氡等,近年来地下水开采、工程建设等人为活动干扰逐渐增多,定点前兆观测资料的稳定性受到巨大影响。地震学家们也在不断进行新的探索,地球化学逐渐成为地震前兆地下流体研究的新方向,高光谱遥感技术为其中之一。

通过大量的断层土壤气测量发现大震之前活动断裂带会排放大量的气体(汪成民等,1991;车用太等,1995;邵永新,2012),地震学家们通过遥感技术研究也观测到大地震引起的断裂带排气作用,导致大气中不同参数的气体浓度发生变化(陈彧等,2008)。大量遥感数据研究发现大震前会出现多参数的异常变化(Singh et al,2010a,2010b;Tronin et al,2002;崔月菊等,2012;崔月菊,2014),如2001年1月26日印度古加拉特(Gujarat)7.8级、2008年5月12日汶川8.0级、2010年4月14日玉树7.1级地震等。由于大震前气体浓度变化,导致一系列物理化学反应,进一步造成震前不同参数的同步异常出现,包括不同气体异常(Cui et al,2019)、热异常(Wei et al,2020)、电离层异常(翟笃林等,2020)、气溶胶异常(Qin et al,

[收稿日期] 2020-12-27 [修定日期] 2021-08-11

[项目类别] 国家重点研发计划专题“星地联合的近地表气体背景场构建与地震异常识别”(2019YFC1509203-6)、河北省地震局科技星火计划项目(DZ202108090107、DZ20190415003、DZ20180322026、DZ20160406028)共同资助

[作者简介] 丁志华,女,1985年生,工程师,主要从事地下流体地震预测研究工作。E-mail:dingzhihua685@163.com

崔月菊,通讯作者,女,1985年生,副研究员,主要从事遥感地球化学研究工作。E-mail:cehuicuiyueju@126.com

2014; Liu et al, 2020), 这些异常的出现对于了解岩石圈—大气过程(何苗等, 2020) 具有重要作用。同时, 遥感数据探测到的不同参数异常信息与地震关系密切, 可以作为监测地震的指标参数(Cui et al, 2017)。以上研究表明利用高光谱遥感技术提取地震引起的气体成分变化是可行的技术、方法(Cui et al, 2013)。

在华北地区高光谱遥感气体背景场的研究中, 发现 2015 年 4 月 15 日阿拉善左旗 5.8 级地震前出现了明显的高值异常(丁志华等, 2019; 李新艳等, 2019), 可见高光谱遥感气体在中等地震前也会有一定的异常信息, 这值得更深入的研究。

2020 年 7 月 12 日 6 时 38 分河北唐山市古冶区(39.78°N, 118.44°E) 发生 5.1 级地震, 震源深度 10km。距此次地震最近的断层为大沙铺断裂, 距离 8.5km, 震源机制解为走滑型。本文通过 RST(Robust Satellite Technique) 算法提取唐山 5.1 级地震前高光谱气体异常信息, 发现唐山地震前, 震中附近多种高光谱气体参数出现同步异常。

1 数据和方法

本文中所用的 CH_4 、 CO 、 H_2O 、 O_3 数据均来自美国宇航局 NASA 大气红外探测仪(AIRS), 该探测仪是美国 2002 年发射的一颗搭载在太阳同步极轨卫星 AQUA/EOS 上的传感器, 为采用光栅格分光的高光谱分辨率大气探测仪器, 光谱分辨率达 $1/\lambda = 1200$, 轨道重复周期 16 天, 全球 80% 的地区可以实现一天两次覆盖。数据可在 NASA Goddard 地球科学数据和信息中心(DISC) 下载, 本文选用 AIRS 三级日标准产品数据(AIRS3STD), 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。该数据可用 matlab 直接读取(孙玉涛, 2014)。

CH_4 、 CO 、 H_2O 、 O_3 等气体浓度受季节变化和区域性因素影响, 具有明显的季节性和地域性变化特征(Adushkin et al, 2013), 通过构建不同气体各自区域的月背景场, 计算观测值与背景场差值, 可以排除气候、地形等因素影响(孙珂, 2017), 即通过 RST 算法进行异常提取。

首先, 利用 2004—2016 年 AIRS 标准产品数据中 CO 、 CH_4 、 O_3 等不同参数的月平均数据构建华北地区高光谱气体月背景场, 求得全球不同位置 (x, y) 处气体背景场 (G_{bac}) , 为 N 年(2004—2016 年) 历史数据的算术平均值, 即

$$G_{\text{bac}}(x, y, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i(x, y, t)) \quad (1)$$

其中, i 为年份, t 为月份, $G_i(x, y, t)$ 为全球不同位置不同时间气体浓度。

然后, 求得各地区不同时间气体浓度 (G_{day}) 与背景场 (G_{bac}) 的差值 ΔG , 即

$$\Delta G(x, y) = G_{\text{day}}(x, y) - G_{\text{bac}}(x, y) \quad (2)$$

以此来剔除气候、地形等因素对高光谱气体的影响, 之后计算标准差, 即

$$\sigma(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [G(x, y) - G_{\text{bac}}(x, y)]^2 / (N - 1)} \quad (3)$$

再将 ΔG 与标准差 $\sigma(x, y)$ 进行比较, 即

$$\otimes(x, y) = \frac{\Delta G(x, y)}{\sigma(x, y)} \quad (4)$$

通过以上方法提取异常信息, 判断异常强度。 $\otimes(x, y)$ 越大表示异常强度越高, $\otimes(x, y)$ 越低表示异常强度越不明显。

由于高光谱遥感数据日值缺数较多,对日值数据进行滑动平均处理,取前8日平均值,可去除缺数的影响,即

$$G_{\text{day}}(x,y) = \frac{G_{\text{day}}(x,y) + (G_{\text{day}-1}(x,y) + G_{\text{day}-2}(x,y) + \dots + G_{\text{day}-7}(x,y))}{8} \quad (5)$$

2 结果

通过式(5)对日值数据进行滑动处理,之后根据式(2)、(3)、(4)进行计算,去除背景场的影响,绘制7月12日唐山5.1级地震前12天内高光谱不同参数异常分布图,发现地震前8天内高光谱气体出现了多参数高值异常,7月3日起震中附近依次出现CH₄、CO、H₂O、O₃高值异常(图1~4)。

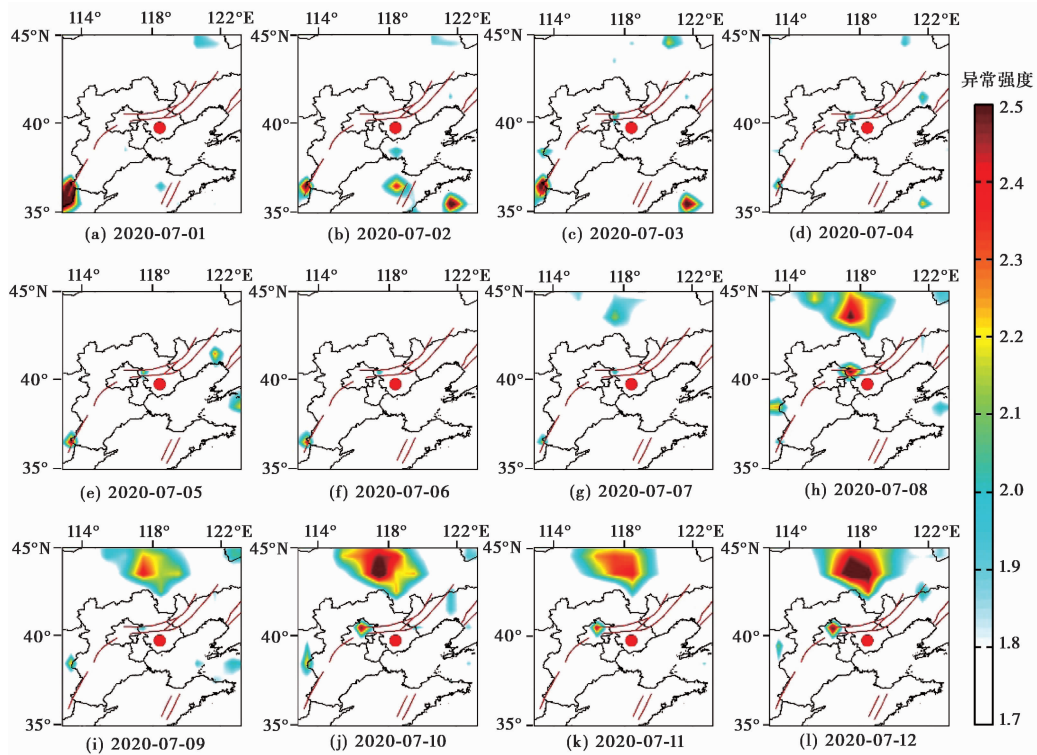


图1 2020年7月1—12日CH₄异常分布

CH₄高值异常出现较早,于7月3日开始出现,异常幅度较小,约为2.0⊗(x,y),7月8日异常幅度达到最大值,最大幅度约为2.6⊗(x,y),之后逐渐减小至发震。异常主要分布于震中西北方向,沿唐山断裂分布,有向西迁移的迹象(图1)。

CO异常出现于7月4日,异常出现位置与CH₄较一致,沿唐山断裂带分布,7月5—6日达到最大值,异常最大幅度为2.1⊗(x,y),之后消失,发震当日无异常出现(图2)。

7月5日可明显看到H₂O异常,异常出现位置与CH₄、CO较一致,均沿唐山断裂带分布,7月6—7日达到最大值,异常最大幅度为2.1⊗(x,y),之后消失,发震当日无异常出现

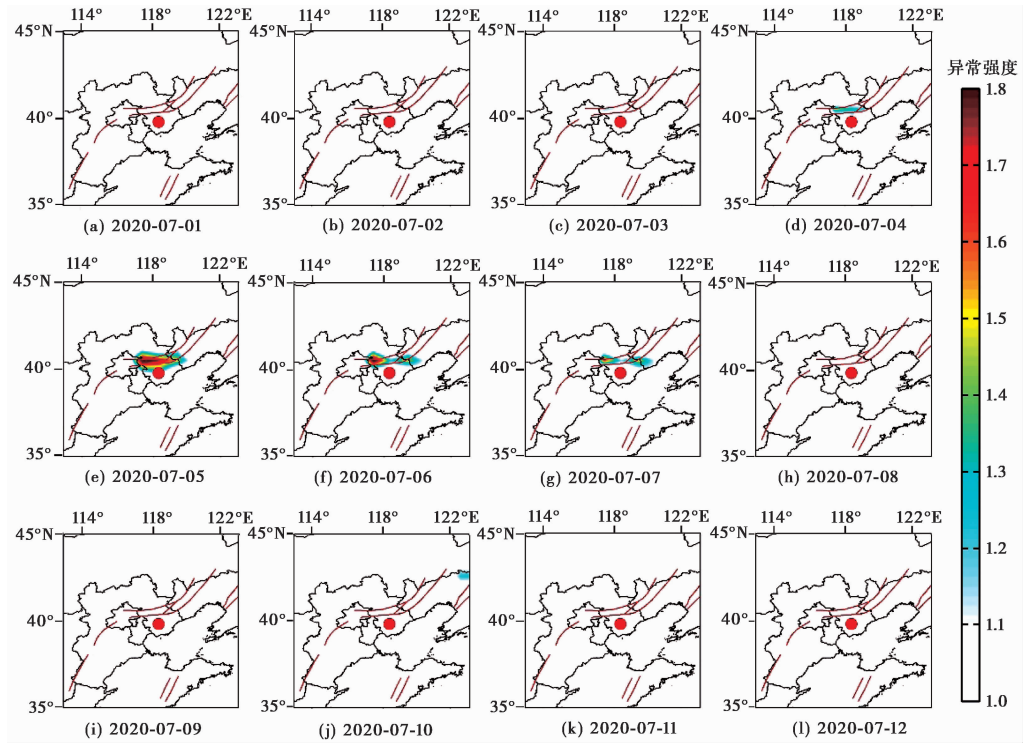


图 2 2020 年 7 月 1—12 日 CO 异常分布

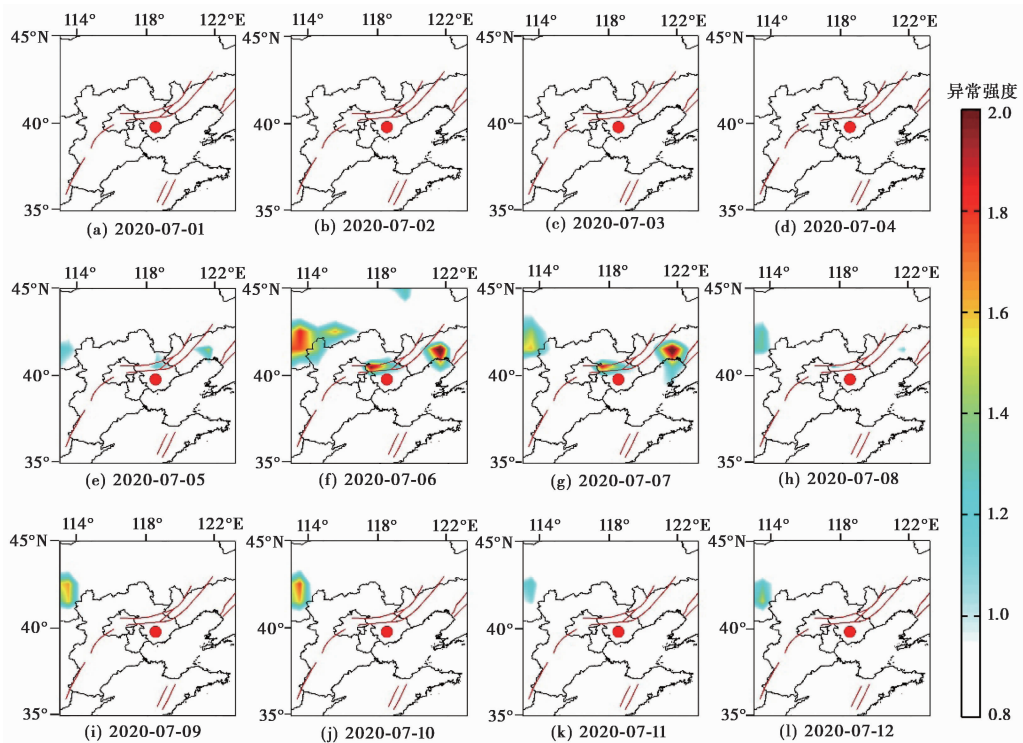


图 3 2020 年 7 月 1—12 日 H₂O 异常分布

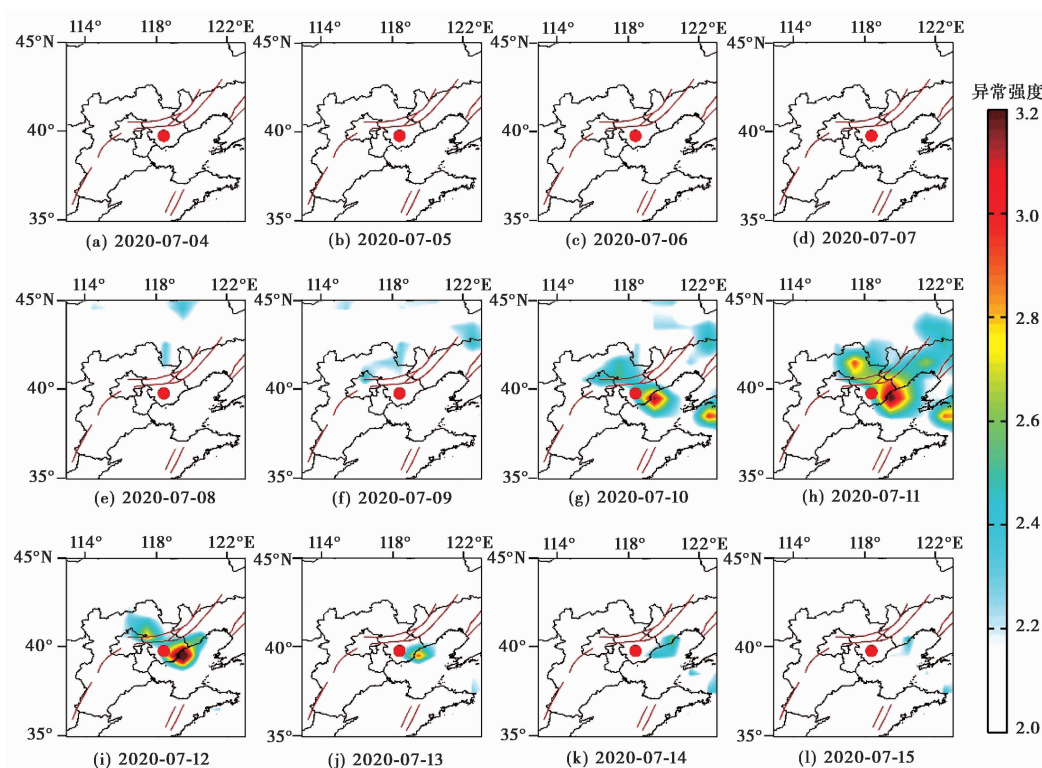


图4 2020年7月4—15日O₃异常分布

(图3)。

O₃异常出现于7月10日,异常呈椭圆形分布,发震当天异常幅度达到最大,为 $3.7 \otimes (x, y)$,异常主要分布于震中东侧。发震后异常逐渐减小至消失(图4)。

综上,发现唐山5.1级地震前CH₄、CO、H₂O和O₃同步出现了高值异常,前三种气体异常出现位置一致,CH₄异常幅度高于CO和H₂O,且异常出现时间早于CO和H₂O。O₃异常出现位置、强度、时间与CH₄、CO、H₂O不同。

3 可靠性检验

唐山5.1级地震前,CH₄、CO、H₂O异常出现的时间、地点具有较强的同步性,不同气体异常同步出现是否可以作为信度较高的指标进行应用,需要对其可靠性进行进一步检验。

对唐山地区2018—2020年发生的地震震中200km范围内的三种气体进行异常提取,一组高于 $2 \otimes (x, y)$ 的异常记为1次,为较好确定异常出现的位置,异常出现位置分为古冶地震震中附近、东、南、西、北、东南、西南、西北、东北9个位置,异常时间为异常出现的日期,统计结果见表1。

通过表1的统计结果发现,2018—2020年唐山地区CH₄异常出现14次,CO异常出现10次,H₂O异常出现5次,可见单种气体异常出现频率较高,异常信度较低,而三种气体异常同步出现仅1次,即唐山5.1级地震前的三种气体同步异常,三种气体异常出现时间相差1天,异常

表 1 2018—2020 年 CH₄、CO、H₂O 高值异常时间和位置

气体	异常时间 (年-月-日)	异常位置	气体	异常时间 (年-月-日)	异常位置	气体	异常时间 (年-月-日)	异常位置
CH ₄	2018-02-22	震中西北	CO	2018-01-26	震中西向	H ₂ O	2018-05-06	震中东向
	2018-05-10	震中北向		2018-10-15	震中附近			
	2018-05-25	震中附近		2018-11-08	震中西北			
	2018-06-18	震中西北		2019-03-11	震中附近			
	2018-07-11	震中西向		2019-08-13	震中北			
	2018-08-21	震中西北		2019-09-11	震中西北			
	2018-08-31	震中北		2019-09-11	震中西北			
				2020-03-03	震中西			
				2020-07-04	震中附近			
				2020-07-04	震中附近			
				2020-10-16	震中附近			
				2020-11-01	震中西			
				2020-02-02	震中西北			
				2020-07-05	震中附近			
总数	12 次		总数	10 次		总数	5 次	

出现位置一致,可见三种不同气体异常的同步性相对于单一气体异常具有更高的信度。

唐山 5.1 级地震前,马未宇等(2020)基于引潮力变化周期,开展了长波辐射(OLR)和大气温度研究,发现震前 OLR 在 7 月 7 日出现了明显的辐射增强,大气温度同步出现了升高的变化。以上异常出现时间与本研究气体异常出现时间基本一致,对佐证高光谱不同气体同步异常的可靠性有一定的价值。

4 讨论与结论

通过梳理唐山 5.1 级地震前高光谱不同参数异常分布特征,得到以下几点认识:

(1) 对高光谱气体进行异常提取,发现在空间尺度上,CH₄、CO、H₂O 三种气体异常出现具有明显的同步性,均位于震中西北方向,沿唐山断裂带分布,异常幅度超过 $2\sigma(x,y)$ 。分析认为可能是在地震孕育和发生过程中应力不断积累,随着应力增大,引起地壳产生微破裂,而断裂带更容易形成气体通道,地下气体沿微裂隙通道向上移动,释放到地表,并参与光化学反应作用,导致不同参数同步发生异常变化。可见应力积累、地表微裂隙的产生和光化学反应,是三种气体异常出现的根本原因。

(2) 从时间尺度上看,CH₄ 高值异常出现最早,CO 随后出现,H₂O 出现最晚。同时,CH₄ 出现时间最长,异常幅度最高,CO 次之,H₂O 最低,认为三种气体中,地表释放 CH₄ 最多,CO 和 H₂O 次之,CO 和 H₂O 异常主要是受 CH₄ 光化学反应控制。三种气体出现时间的滞后性和异常幅度均证明了这一结论。CO 是 CH₄ 在空气中发生光化学反应的过渡产物,反应式为 $\text{CH}_4 + 4\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{O}_3$ 。随着 CH₄ 浓度异常幅度越来越大,参与光化学反应的 CH₄ 越来越多,导致 CO 和 H₂O 的浓度升高,因此 CH₄ 升高会导致 CO 和 H₂O 升高,但 CO 和 H₂O 高值异常出现具有一定的滞后性。CH₄ 相对于 CO 和 H₂O 出现最早,幅度较大,且是地表微破裂最直观的体现,因此认为,在进行异常提取时,CH₄ 具有更直观、更明显的异常特征,相对于其他参数具有更好的中短期预报效果,但使用单独一种气体作为异常指标信度较低,而多参数异常出现的同步性可作为辅助手段,以提高异常性质判定的信度。

(3) 大量 7 级以上震例研究发现地震前同步出现了 CH₄、CO 的高值异常,异常位置多在附近的断裂带上,异常出现时间和异常幅度与震级关系不大,可能受发震构造影响较大。而多种气体对比分析和 5 级地震震例的研究不多,从本文研究成果来看,唐山古冶 5.1 级地震与 7 级以上大震具有相同的高光谱气体异常特征,多种气体同步异常出现的时间、幅度与震级无直接关联,也可能受发震构造影响较大。

(4) 从多参数异常分布特征来看,CH₄、CO、H₂O 在时间、空间、强度均有较强的相关性,而 O₃ 与三种气体出现的位置、强度和时间的均有较大差别。分析认为 O₃ 异常变化机理有别于 CH₄、CO、H₂O,是更为复杂的岩石层-大气层-电离层耦合作用的结果。震前随着地下应力的增强和震源附近地区地壳中裂隙的增多、扩展与沟通,造成气体成分变化,通过复杂的光化学反应,再加上大气动力变化,造成 O₃ 的异常变化。

利用高光谱气体进行地震预测预报是一个新兴的手段,但是由于受气象等因素影响较大,单一参数异常识别信度较低,主观性较强。通过对高光谱气体进行多参数异常提取,对不同参数进行连续跟踪观测,提取多参数同步异常信息,可以提高异常性质判定的信度,为短临预报提供新的思路和方法。不同参数影响机理还需要进一步深入分析研究。

参考文献

- 车用太,张大维,金鱼子,等,1995. 断层带土壤气的映震效能与地震短期预报. 中国地震,11(4):374~380.
- 陈彧,徐瑞松,蔡睿,等,2008. 遥感技术在地震研究中的应用进展. 地球物理学进展,23(4):1273~1281.
- 崔月菊,2014. 大地震前后 CO、O₃ 和 CH₄ 遥感地球化学异常特征. 博士学位论文. 北京:中国地质大学(北京).
- 崔月菊,杜建国,张德会,等,2012. 应用于地震预测的遥感气体地球化学. 地球科学进展,27(10):1173~1177.

- 丁志华,崔月菊,盛艳蕊,等,2019. 高光谱气体背景场特征及震情跟踪应用前景. 华北地震科学, **37**(3):44~49.
- 何苗,吴立新,崔静,等,2020. 汶川地震前多圈层短-临遥感异常回顾及其时空关联性. 遥感学报, **24**(6):681~700.
- 李新艳,崔月菊,马禾青,等. 2019. 2015 年 4 月 15 日内蒙古阿拉善左旗 M_s 5.8 地震前后 CH_4 和 CO 变化. 地震, **39**(4):54~62.
- 马未宇,于晨,姚琪,等. 2020. 2020 年 7 月 12 日唐山 M_s 5.1 地震遥感热参量时空变化分析. 中国地震, **36**(3):367~374.
- 邵永新,2012. 土壤氦方法用于断层活动性研究的讨论. 中国地震, **28**(1):51~60.
- 孙珂,2017. 基于卫星遥感反演的地震热红外算法及特征研究. 博士学位论文. 北京:中国地震局地质研究所.
- 孙玉涛,2014. 高光谱遥感气体地球化学异常形成机理. 硕士学位论文. 北京:中国地震局地震预测研究所.
- 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.
- 翟笃林,祝芙英,林剑,等,2020. 基于地基 GPS-TEC 的中国区域地震电离层效应研究. 中国地震, **36**(4):857~871.
- Adushkin V V, Kudryavtsev V P, 2013. Estimating the global flux of methane into the atmosphere and its seasonal variations. *Izv Atmos Ocean Phys*, **49**(2):128~136.
- Cui J, Shen X H, Zhang J F, et al, 2019. Analysis of spatiotemporal variations in middle-tropospheric to upper-tropospheric methane during the Wenchuan $M_s=8.0$ earthquake by three indices. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **19**(12):2841~2854.
- Cui Y, Du J, Zhang D, et al, 2013. Anomalies of total column CO and O_3 associated with great earthquakes in recent years. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **13**(10):2513~2519.
- Cui Y, Ouzounov D, Hatzopoulos N, et al, 2017. Satellite observation of CH_4 and CO anomalies associated with the Wenchuan M_s 8.0 and Lushan M_s 7.0 earthquakes in China. *Chem Geol*, **469**:185~191.
- Liu Q Q, Shen X H, Zhang J F, et al, 2020. Aerosol anomalies associated with occurrence of recent strong earthquakes ($>M8.0$). *Terr Atmos Ocean Sci*, **31**(6):677~689.
- Qin K, Wu L X, Zheng S, et al, 2014. Is there an abnormal enhancement of atmospheric aerosol before the 2008 Wenchuan earthquake? *Adv Space Res*, **54**(6):1029~1034.
- Singh R P, Kumar S J, Zlotnicki J, et al, 2010b. Satellite detection of carbon monoxide emission prior to the Gujarat earthquake of 26 January 2001. *Appl Geochem*, **25**(4):580~585.
- Singh R P, Mehdi W, Gautam R, et al, 2010a. Precursory signals using satellite and ground data associated with the Wenchuan Earthquake of 12 May 2008. *Int J Remote Sens*, **21**(13):3341~3354.
- Tronin A A, Hayakawa M, Molchanov O A, 2002. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China. *J Geodynam*, **33**(4~5):519~534.
- Wei C X, Lu X C, Zhang Y S, et al, 2020. A time-frequency analysis of the thermal radiation background anomalies caused by large earthquakes: a case study of the Wenchuan 8.0 earthquake. *Adv Space Res*, **65**(1):435~445.

The Abnormal Characteristics of Hyperspectral Multi-parameter before the Tangshan *M*5.1 Earthquake on July 12, 2020

Ding Zhihua¹⁾, Cui Yueju²⁾, Tang Jie¹⁾

1) Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, China

2) Key Laboratory of Earthquake Prediction, Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China

Abstract By extracting the abnormal information from satellite hyperspectral data before the Tangshan *M*5.1 earthquake on July 12, 2020, we found that overall CH₄, CO, H₂O, and O₃ had high-value anomalies before the earthquake. The anomalies are all found near the epicenter, and the anomaly amplitudes are 2 times higher than the mean square error. The abnormal mechanism of CH₄, CO and H₂O is different from that of O₃. Based on statistics of the frequency of occurrence of the three gases CH₄, CO, and H₂O from 2018 to 2020, we believe that the synchronization anomaly is reliable. The synchronization of hyperspectral multi-parameter abnormality can improve the reliability of abnormality determination. Through continuous tracking of different parameters, it has certain reference significance for short-term earthquake prediction.

Keywords: Hyperspectral; Multiple parameters; Anomaly extraction; RST algorithm