Advances in Geosciences 地球科学前沿, 2022, 12(12), 1689-1702
Published Online December 2022 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/ag
https://doi.org/10.12677/ag.2022.1212164

2022年泸定M_S6.8地震震源放气过程的卫星空间信息回溯研究

赵　谊[1,2]，马宝君[2]，梁捷尉[3]，张　彬[1]，房　娜[3]，刘　婷[3]，司朝盛[3]，莫崇铭[3]

[1]应急管理部国家自然灾害防治研究院，北京
[2]黑龙江省地震局，黑龙江 哈尔滨
[3]广东海启星海洋科技有限公司，广东 广州

收稿日期：2022年10月11日；录用日期：2022年12月24日；发布日期：2022年12月31日

摘　要

从大气层中的气体异常源算法模型出发，给出垂直浓度梯度判定指标是判定来自本地区气体，还是远程漂移过来的。基于美国的AQUA/AIRS高光谱数据，得到空间信息的时空呼应证据——从大气层到地表路径物理信息，以及大气层到地表路径化学信息。基于泸定6.8级地震卫星空间信息与地表观测信息，通过回溯和定位，实现两者的有机结合。以可检测的算法模型，可量化的指标，可验证的地震事件，总结归纳回溯地震过程中气体释放所经历的通道和轨迹。结果表明，来自震源的物质以断层溢出气体为载体携带了大量的震源物质信息，天地同震过程中是存在着气体传输通道的。

关键词

震源放气过程，空间信息回溯，天地同震，气体通道

Backtracking of Satellite Spatial Information on Source Venting Process of Luding M_S6.8 Earthquake, 2022

Yi Zhao[1,2], Baojun Ma[2], Jiewei Liang[3], Bin Zhang[1], Na Fang[3], Ting Liu[3], Chaosheng Si[3], Chongming Mo[3]

[1]National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management, Beijing
[2]Earthquake Bureau of Heilongjiang Province, Harbin Heilongjiang
[3]Guangdong Haiqixing Marine Technology Co., LTD., Guangzhou Guangdong

Received: Oct. 11th, 2022; accepted: Dec. 24th, 2022; published: Dec. 31st, 2022

文章引用: 赵谊, 马宝君, 梁捷尉, 张彬, 房娜, 刘婷, 司朝盛, 莫崇铭. 2022 年泸定 M_S6.8 地震震源放气过程的卫星空间信息回溯研究[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(12): 1689-1702. DOI: 10.12677/ag.2022.1212164

Abstract

Based on the gas anomaly source algorithm model in the atmosphere, the determination index of vertical concentration gradient is given to determine whether the gas comes from the local area or from remote drift. Based on the AQUA/AIRS hyperspectral data from the United States, the spatio-temporal echo evidence of spatial information is obtained, including the physical information of the path from the atmosphere to the surface, and the chemical information of the path from the atmosphere to the surface. Based on the Luding M6.8 seismic satellite spatial information and surface observation information, the organic combination of the two is realized through backtracking and positioning. By means of detectable algorithm model, quantifiable index and verifiable seismic event, the passage and trajectory of gas release during earthquake are summarized and traced back. The results show that the source material carries a large amount of source material information with the fault overflow gas as the carrier, and there is a gas transmission channel in the co-seismic process between earth and earth.

Keywords

Source Venting Process, Spatial Information Backtracking, Earth Co-Seismic, Gas Channel

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

地球每时每刻都在向外界排放着各种气体，主要成份包括二氧化碳、甲烷、硫化氢等，这是地球上的一种普遍现象。地球排气最常见、最典型的例子就是火山喷发。它既可以来自于地球的深部，也可以来自于浅部；既可以通过大的断裂，也可以通过遍布世界各地的温泉、热泉排出；既可以是大范围的突发性放气，也可以是沿着疏松介质持续或断断续续的放气。某些时候，突发的排气现象还可以作为地震(EQ)的异常现象，一些地震工作者尝试利用它来预报地震。

人类的认识规律都是随着资料积累的加大而不断地深入。从 1966 年邢台地震以后，我国正式开始了国家行为的地震预报，科技工作者的思路大多是盯着地下，因为破坏性地震大都是在地下 10 公里或更深的地壳中孕育和发生，总结半个多世纪的努力发现预报准确率不超过 30%，是否是努力方向出了问题，那么那 70%的地震信息哪里去了呢？

认真反思：预报的哲学思想出了问题。缺失的 70%的信息量哪里去了？在地壳之外的外部空间，因为，地震是发生在地壳的浅部或深部，所以我们的注意力一直盯着地下。正是因为如此，才忽视了这外部空间的信息。

努力方向取决于地震预报思维方式，换个思维：眼睛“不能只盯着地下”，地震预报应该向空间发展，向空间进军。

随着人类空间对地观测技术的提高，发现了地壳中的强烈地震发生前与之呼应的空间电离层 TEC 的同步变化，日本北海道大学日置幸介教授发现[1]，在地震发生的 40 分钟前甚至更久，震中上空的电子密度略微增加，已经在 18 个大地震震前发现了类似的电子信号。在过去 8 年中，开始逐渐相信这种电子信号是真实存在的。同时，世界各地的地震科学家都先后发文记述这种现象和震例。如果能证实电子变化与地震发生之间的关系，研究结果可以更好地应用到地震预测。

如：Bogdanov Yu. A [2]等，2003 总结了克里米亚地区 2002 年 7~8 月期间的系列地震前的电离层异常；Hayakawa [3]等，2007 总结了 1995 年神户地震前的电离层异常；蔡军涛[4]等，2007；余涛等[5]，2009 总结了 2008 汶川地震前的电离层异常。后面如雨后春笋破除地面般地涌出大量这一专题的文章，直至 Erik Vance [6]，2018 发表了“发生在天空中的地震”一文，解释了在应力作用下岩石破裂过程中存在着气体(CO、O_3、CH_4 等)的释放，释放的气体通过断层裂隙运移进入大气，从而导致气体异常。继而科学家们的争论焦点转向：关于气体是如何从地下传输到天空的？即传输机制问题。目前争论的焦点归结起来无非是三种类型的文章：第一种类型是气体传输的地球化学途径；第二种类型是声重力波传输途径；第三种类型是电磁场传输机制。同时，引出了天地同震的概念和思考。

本文聚焦在地球化学途径，既然在大气层之外的空间找到了与强震息息相关的 TEC 证据，那么从地下到地面，再到空间，这中间隔着一个大气层，那么气体向上传输的过程中一定要经过大气层，能不留下轨迹和痕迹吗？而监测大气层中的气体浓度变化，最有效手段莫过于卫星高光谱分析。于是乎，便有了建立卫星高光谱气体溯源模型建立的想法和思路，因此就有了国家重点研发计划(2019YFC1509203)和院长基金(ZDJ2021-11)联合资助。

据中国地震台网正式测定，2022 年 9 月 5 日四川省州泸定发生 6.8 级地震，震源深度 16 千米。这次地震发生在鲜水河断裂雪门坎－磨西段，属于川滇活动块体的北东边界，通过地震监测和科学科考调查发现泸定地震震中及周围断层存在气体溢出现象。地球的排气作用就是在地下很大的压力、温度、浓度、密度、粘度梯度下反重力向外向上排放喷流到大气层的过程。本文把泸定 6.8 级地震卫星空间信息与地表观测信息有机地结合起来，以可检测的算法模型，可量化的指标，可验证的地震事件，总结归纳回溯地震过程中气体释放所经历的通道和轨迹。

2. 空间信息回溯

2.1. 气体是本区域地下来源的证据

气体递减式垂直浓度梯度是本地来源，选择研究区域范围：97˚~107˚E，27˚~34˚N。地震前一个月设为背景值，8 月 30 日到 9 月 4 日视为地震前，9 月 5 日至 9 月 6 日视作地震发生期。

图 1~图 4 分别是三个阶段中 AIRS 观测到的 CO 和 CH_4 的体积混合比(VMR)，将 AIRS 数据按照升降轨区分是因为两者之间时间跨度加大，升轨时间大约在早上四点四十分到七点四十分，降轨时间大约在下午的五点五十分到晚上八点四十分。图 5~图 6、图 8~图 9 分别依据区域内最大浓度点以及泸定地震震中位置制作的 CO 和 CH_4 浓度剖面以及一定时间段内的浓度变化图。

从图 1~图 4 可以看出 CH_4 聚集在 150 hPa 到 400 hPa 的区间，在地震前和地震发生时，150 hPa~250 hPa 区间内的 CH_4 浓度降低，图 5 的(a)和(c)、图 8 的(a)和(c)都很好地说明了这点；CO 的特征更加明显，在地震前和地震发生时，600 hPa 附近会有明显的异常点。

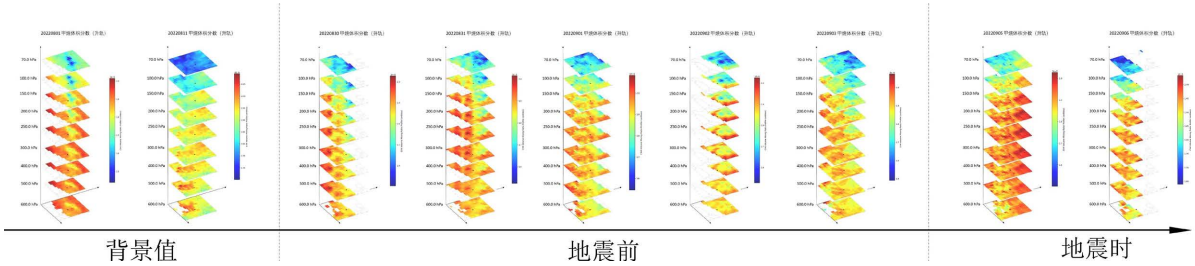


Figure 1. Variation of CH_4 concentration at different heights in AIRS in ascending orbits under the background values of the EQ area—the days before the EQ—the occurring day of the Luding M_s6.8 EQ

图 1. 泸定 6.8 地震背景－震前－震时的升轨状态下 AIRS 甲烷气体浓度不同高度的变化

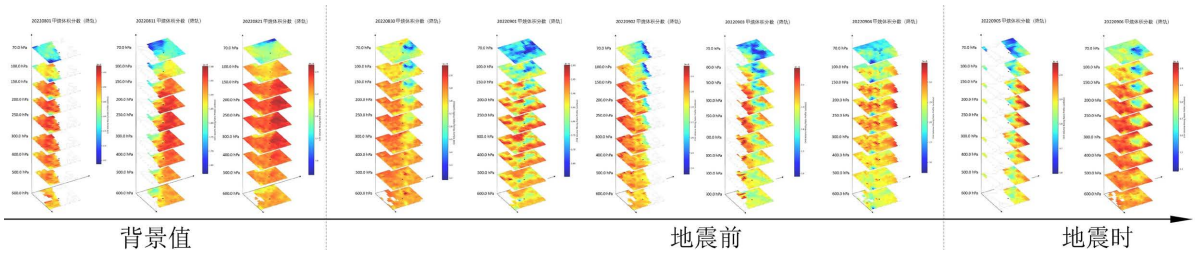


Figure 2. Variation of CH_4 concentration at different heights in AIRS in descending orbits under the background values of the EQ area—the days before the EQ—the occurring day of the Luding M_s6.8 EQ

图 2. 泸定 6.8 地震背景－震前－震时的降轨状态下 AIRS 甲烷气体浓度不同高度的变化

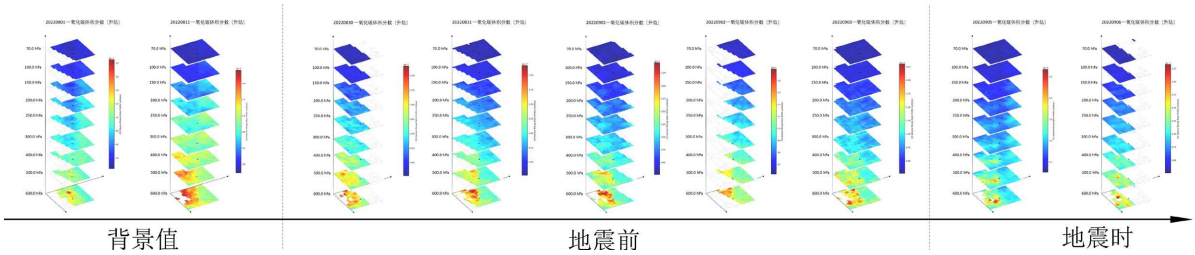


Figure 3. Variation of CO concentration at different heights in AIRS in ascending orbits under the background values of the EQ area—the days before the EQ—the occurring day of the Luding M_s6.8 EQ

图 3. 泸定 6.8 地震背景－震前－震时的升轨状态下 AIRS 一氧化碳气体浓度不同高度的变化

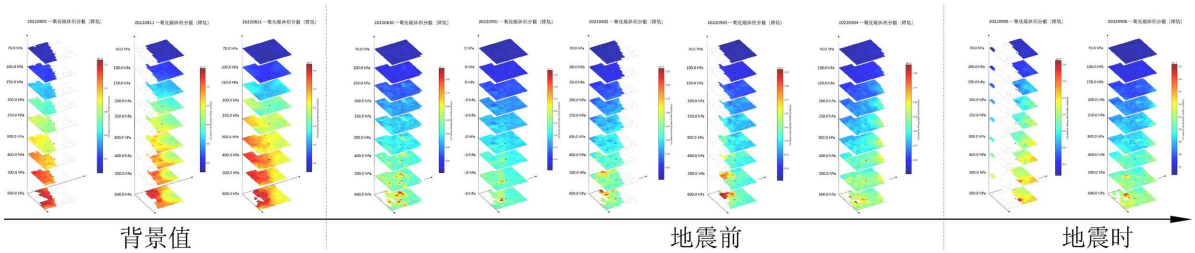


Figure 4. Variation of CO concentration at different heights in AIRS in descending orbits under the background values of the EQ area—the days before the EQ—the occurring day of the Luding M_s6.8 EQ

图 4. 泸定 6.8 地震背景－震前－震时的降轨状态下 AIRS 一氧化碳气体浓度不同高度的变化

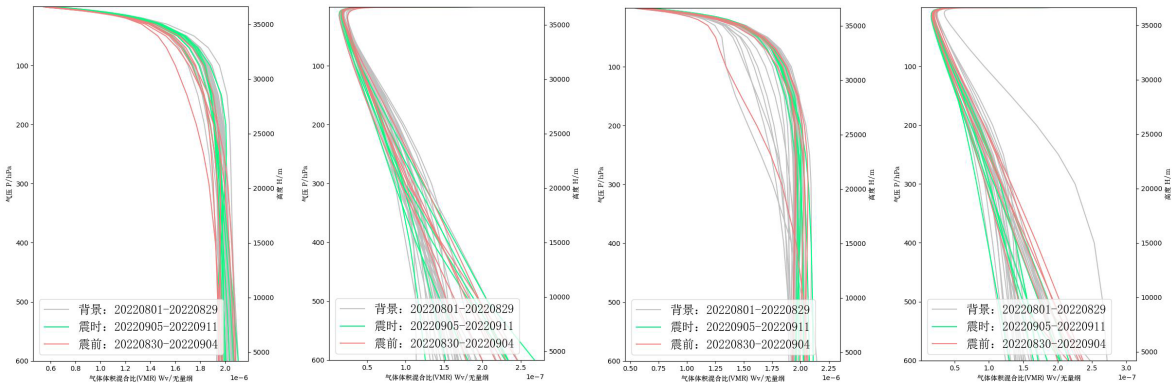


Figure 5. Profiles of vertical gas concentration of CH_4 and CO at the point of maximum gas concentration; (a) Profile of vertical gas concentration of CH_4 in ascending orbits; (b) Profile of vertical gas concentration of CO in ascending orbits; (c) Profile of vertical gas concentration of CH_4 in descending orbits; (d) Profile of vertical gas concentration of CO in descending orbits

图 5. 气体浓度最大点甲烷和一氧化碳的垂直气体浓度剖面图；(a) 升轨时检测到的甲烷垂直浓度剖面图；(b) 升轨时检测到的一氧化碳垂直浓度剖面图；(c) 降轨时检测到的甲烷垂直浓度剖面图；(d) 降轨时检测到的一氧化碳垂直浓度剖面图

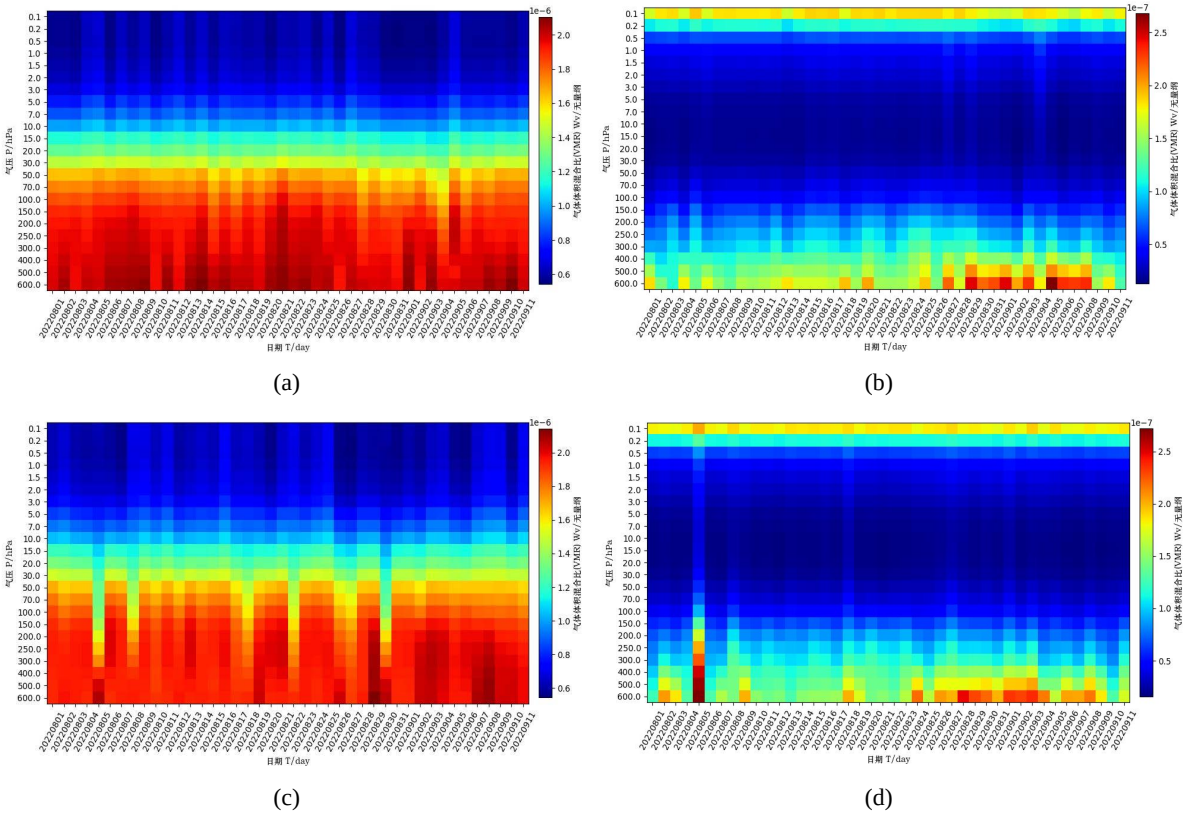


Figure 6. Distribution of vertical gas concentration of CH_4 and CO at the point of maximum gas concentration; (a) Distribution of vertical gas concentration of CH_4 in ascending orbits; (b) Distribution of vertical gas concentration of CO in ascending orbits; (c) Distribution of vertical gas concentration of CH_4 in descending orbits; (d) Distribution of vertical gas concentration of CO in descending orbits

图 6. 气体浓度最大点甲烷和一氧化碳的垂直气体浓度图；(a) 升轨时检测到的甲烷垂直浓度分布图；(b) 升轨时检测到的一氧化碳垂直浓度分布图；(c) 降轨时检测到的甲烷垂直浓度分布图；(d) 降轨时检测到的一氧化碳垂直浓度分布图

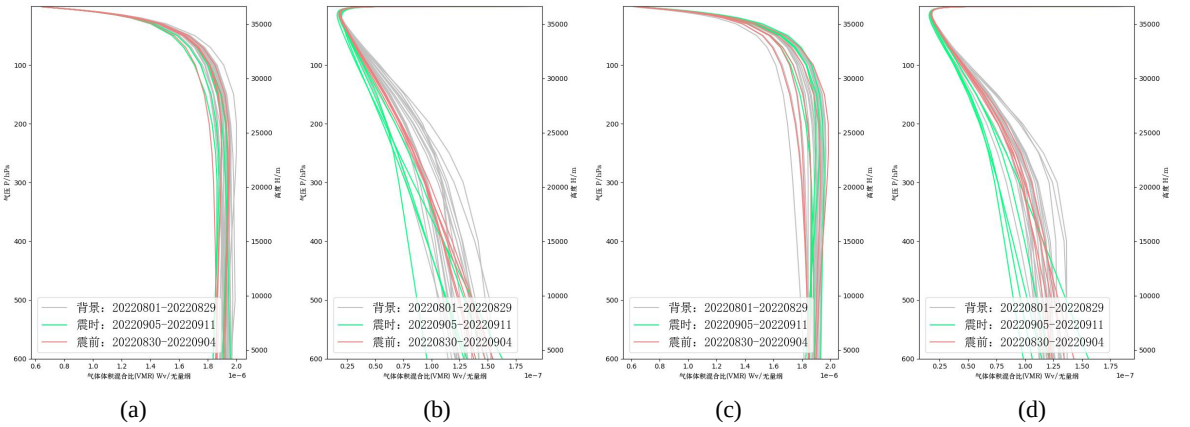


Figure 7. Profiles of vertical gas concentration of CH_4 and CO at the point of the epicenter; (a) Profile of vertical gas concentration of CH_4 in ascending orbits; (b) Profile of vertical gas concentration of CO in ascending orbits; (c) Profile of vertical gas concentration of CH_4 in descending orbits; (d) Profile of vertical gas concentration of CO in descending orbits

图 7. 震中位置甲烷和一氧化碳的垂直气体浓度剖面图；(a) 升轨时检测到的甲烷垂直浓度剖面图；(b) 升轨时检测到的一氧化碳垂直浓度剖面图；(c) 降轨时检测到的甲烷垂直浓度剖面图；(d) 降轨时检测到的一氧化碳垂直浓度剖面图

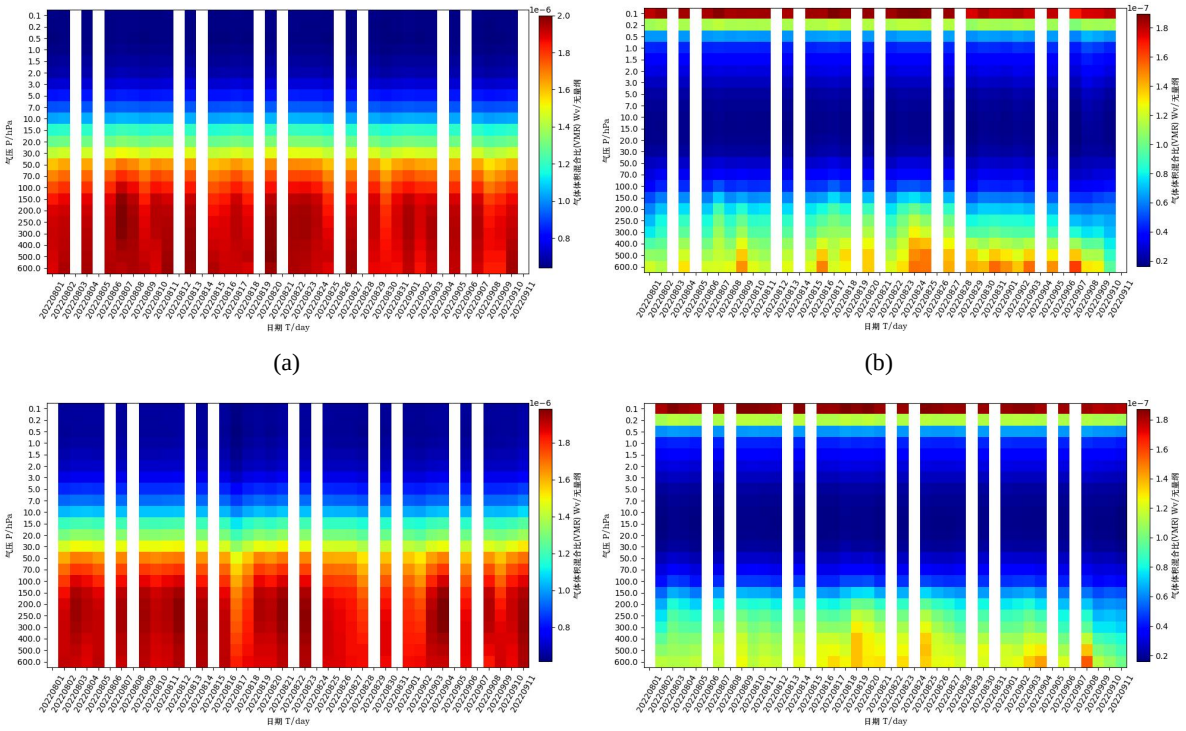


Figure 8. Distribution of vertical gas concentration of CH_4 and CO at the point of the epicenter; (a) Distribution of vertical gas concentration of CH_4 in ascending orbits; (b) Distribution of vertical gas concentration of CO in ascending orbits; (c) Distribution of vertical gas concentration of CH_4 in descending orbits; (d) Distribution of vertical gas concentration of CO in descending orbits

图 8. 震中位置甲烷和一氧化碳的垂直气体浓度图；(a) 升轨时检测到的甲烷垂直浓度分布图；(b) 升轨时检测到的一氧化碳垂直浓度分布图；(c) 降轨时检测到的甲烷垂直浓度分布图；(d) 降轨时检测到的一氧化碳垂直浓度分布图

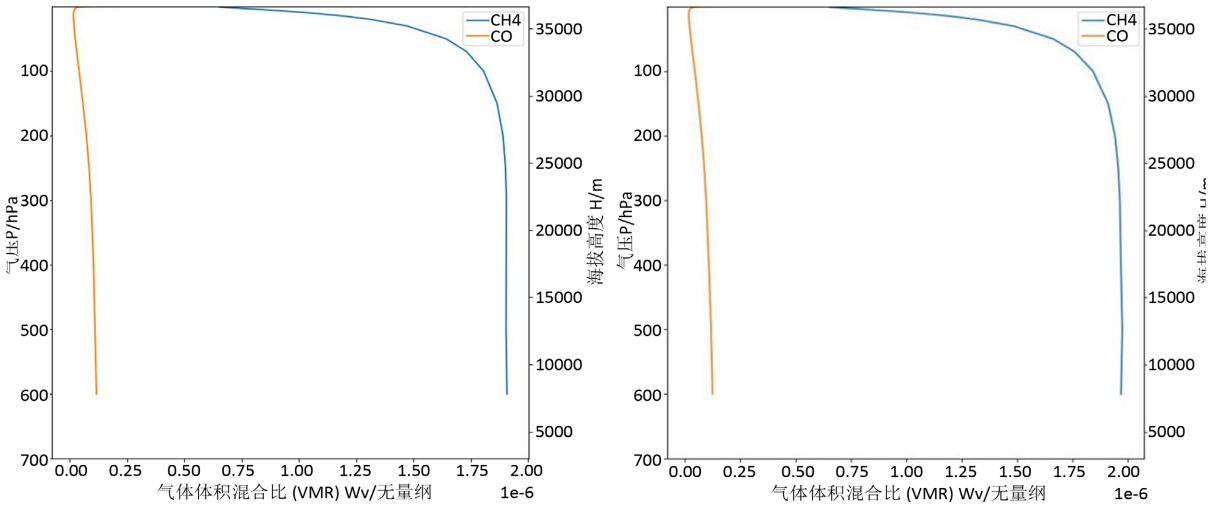
在整个大的区域，地震前大约在 8 月 23~24 日 CO 就开始泄漏了，直到 9 月 9 日才恢复正常，详情可见图 6(b)和图 6(d)的右下部分。CH_4 的垂直气体浓度剖面图 5(a)和图 5(c)也指示了震前 CH_4 浓度与平时有明显的异常。

图 5(c)和图 5(d)以及图 6(b)和图 6(d)在背景时间段也有异常。在查看这些异常出现的日期以及对照四川省地震局的地震目录后，发现 2022 年 8 月到泸定地震为止，四川发生了多次 3.0 级到 3.3 级地震。其中 8 月 5 日的气体浓度如图 8，相信是 8 月 13 日发生都江堰 3.3 级地震提前泄漏，对探测结果进行干扰。都江堰 3.3 级地震震中距离泸定地震震中约 235 公里。

依据泸定地震震中位置画出的 CO 和 CH_4 浓度剖面以及一定时间段内的浓度变化图。图 7 和图 8 很好地表现了地震前 CO 和 CH_4 浓度的变化。尽管图 8(b)中 8 月上旬仍出现 CO 异常，但是信号弱了许多，对照图 6(b)，震中的 CO 浓度与周边地区相近，可以判断图 8(b)中 CO 异常不是本地来源的，是受到外来 CO 的影响。

2.2. 气体是漂移过来的证据

在 600 百帕以下(即 4200 米以下)垂直浓度有暂短的无根现象，说明近处有气体迁移，时间短暂证明距离断层区域不远还有气体溢出源，只是没有地面观测点的数据验证而已，不仅仅是在发震断层上有溢出气体存在，而且震中和发震断层之外还有近距离的震源气体溢出点位，只不过是发震断层的震源气体溢出现象占主导地位。



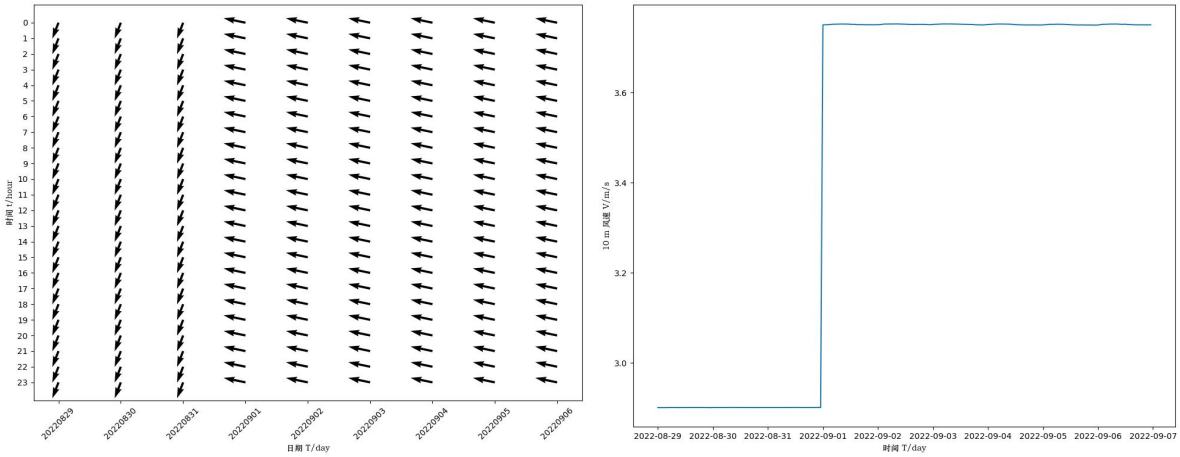
(a) (b)

Figure 9. Profiles of single-day vertical gas concentration of CH_4 and CO at the point of the epicenter; (a) Profile of vertical gas concentration in descending orbits on August 5; (b) Profile of vertical gas concentration in ascending orbits on August 13

图 9. 震中位置甲烷和一氧化碳的单日垂直气体浓度剖面图；(a) 8 月 5 日降轨时的气体垂直浓度剖面；(b) 8 月 13 日升轨时的气体垂直浓度剖面

泸定地震发生在海拔高度达 1560 米高原，气流是极不稳定的。采用 ERA5 风场数据，ERA5 是 ECMWF (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)对全球气候的第五代大气再分析模型，将模型数据与来自世界各地的观测数据结合起来，形成一个全球完整的、一致的数据集。ERA5 取代了其前身 ERA-Interim 再分析。ERA5 DAILY 提供每天 7 个 ERA5 气候再分析参数的汇总值：2 米空气温度、2 米露点温度、总降水量、平均海平面气压、表面气压、10 米风速的 u 分量和 v 分量。此外，根据每小时的 2 米空气温度数据，计算出 2 米处的每日最低和最高空气温度。

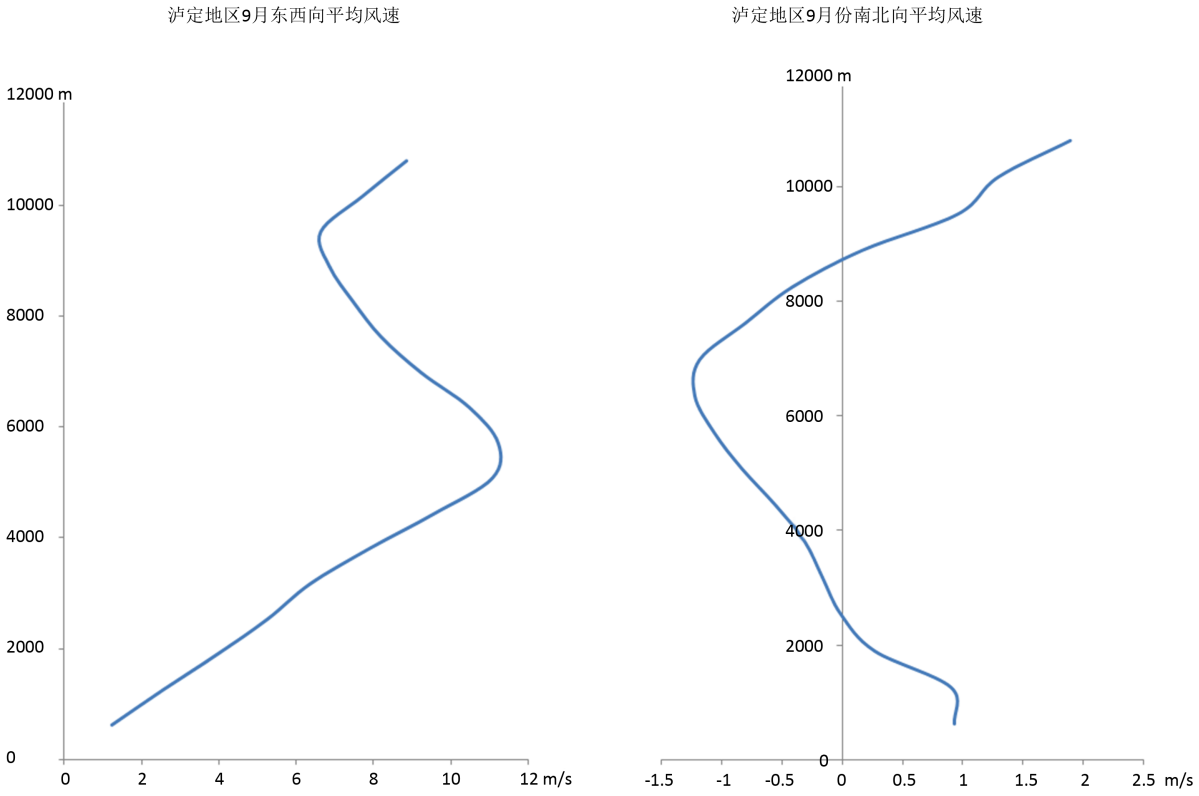
都江堰 3.3 级地震一周前，8 月 5 日确实在卫星高光谱 AIRS 图像上看到其震中的放气信息(图 12)。这一气体源在风场作用下飘到泸定 6.8 地震的震中区与泸定地震前的气体释放叠加在一起，被卫星高光谱垂直浓度分布图检测到(图 9)。



(a) (b)

Figure 10. Horizontal wind field at 10 meters above the ground at the epicenter of the Luding M_s6.8 EQ; (a) Wind direction diagram at 10 meters above the ground at the epicenter; (b) Wind speed diagram at 10 meters above the ground at the epicenter

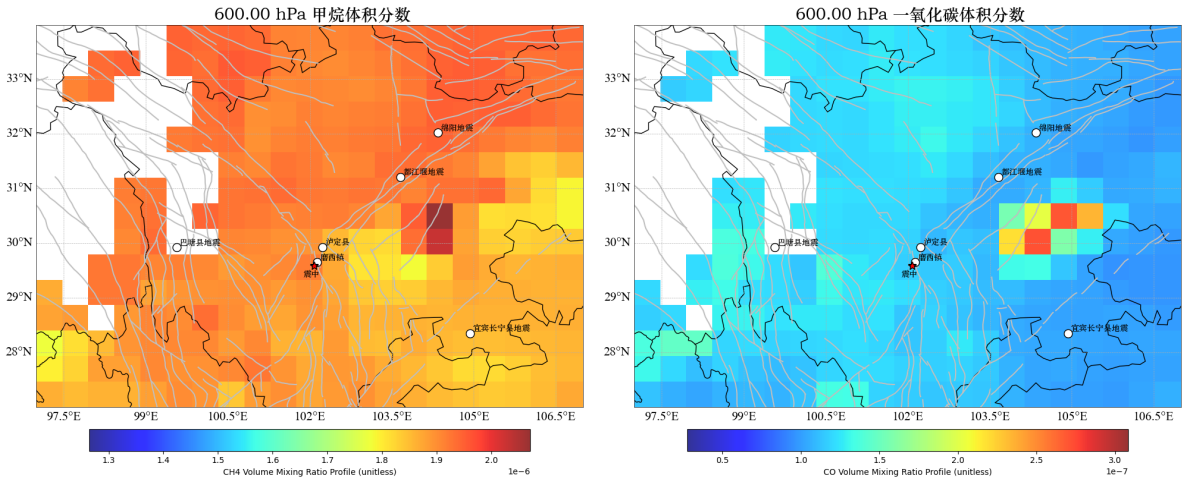
图 10. 泸定 6.8 地震震中地表 10 米的水平风场；(a) 震中地表 10 米风向；(b) 震中地表 10 米风速



(a) (b)

Figure 11. Wind speed map of each layer at the epicenter; (a) East-west vertical wind field at the epicenter in September; (b) North-south vertical wind field at the epicenter in September

图 11. 震中各层风速图；(a) 震中区域 9 月东西向垂直风场；(b) 震中区域 9 月南北向垂直风场



(a) (b)

Figure 12. The gas concentration map below 600 hPa at epicenter on August 5 before the Dujiangyan M_s3.3 EQ; (a)Volume mixing ratio map of CH_4 in descending orbits; (b) Volume mixing ratio map of CO in descending orbits

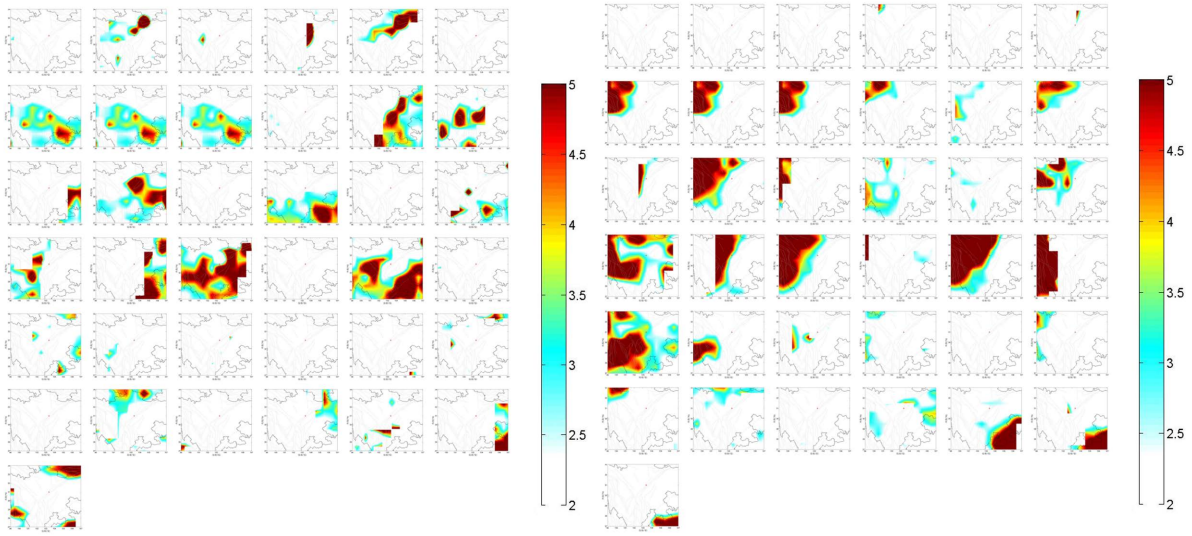
图 12. 8 月 5 日都江堰 3.3 级地震前 600 百帕以下的震中上空气体浓度；(a) 降轨时检测到的甲烷体积混合比；(b) 降轨时检测到的一氧化碳体积混合比

从图 9 可以看出 8 月 5 日到 8 月 13 日在泸定地震震中上空的甲烷和一氧化碳的垂直浓度梯度上看是

无根的，即这一时间段泸定地震的发震断层没有打开，气体是 8 月 13 日都江堰 3.3 级地震的发震断层提前 8 天泄露逸出的气体；这点在图 13 中也清晰地显示出来，据中国地震台网正式测定，8 月 13 日 13 时 18 分在四川成都市都江堰市发生 3.3 级地震，也正是先出现 CH_4，此时 CO 浓度极小。而泸定地震前大约也提前 10 天左右在 8 月 23~24 日 CH_4 和 CO 就开始泄漏了，直到 9 月 9 日才恢复正常，这一气体提前释放的短临时间都是 8~12 天左右。至于都江堰 3.3 地震气体漂移的大气动力学过程由图 9、图 10 和图 11 以及图 12，清晰地给出。

2.3. 平面轨迹线

借鉴崔月菊等[7]，2010 年玉树 Ms7.1 地震前后大气物理化学遥感信息模型；以及崔月菊[8]，探测与 2008 年汶川 Ms8.0 和 2013 年芦山 Ms7.0 地震相关的大气 CH4 和 CO 异常变化的方法；并参考孙玉涛等[9]，苏门答腊两次 M > 8.0 地震前后 CO 和 O_3 气体地球化学异常与地面验证流程。我们引入独创的空天耦合气体输送模型：断层气体溢出至平流层为分子状态存在，我们的统计指标是分子数－摩尔数；进入电离层之后这些气体以电子离子状态存在，统计指标就要以电子浓度离子浓度即 TEC 来设置预警的阈值，天地一体化－天地同震要体现空天地的层圈耦合同步变化(时间上有滞后或超前，但在一个时间内是联动的)，ROTI 是相对于过去一周的 TEC 变化率指数，可以作为空天耦合的链接指标。



(a) (b)

Figure 13. Anomalies of CH_4 (a) and CO (b) before and after the Luding M_s6.8 EQ; (The data of AIRS from August 2nd to September 7th were slidingly averaged, and then the outliers were calculated according to the sliding result)

图 13. 泸定 6.8 地震前后的 CH_4(a)和 CO(b)异常；(对 8 月 2 日至 9 月 7 日的 AIRS 的数据进行滑动平均，再根据滑动结果算出异常)

基于美国的 AQUA/AIRS 高光谱数据，对 8 月 2 日至 9 月 7 日的 AIRS 的数据进行滑动平均，再根据滑动结果算出异常(见图 13)，从而得到空间信息的时空呼应证据——从大气层到地表路径物理信息。

CH_4 最先溢出地表，因此主要以 CH_4 的气体浓度最大值点位来溯源，如图 14 所示，再把 ROTI 值在 0.3 以下的去掉后，经过筛选，螺旋线，CH_4 取自 40 个点，CO 取自 33 个点，后选择靠近震中区域制图。

从 8 月 1 日至 9 月 7 日(图 15)，展示时间流动和气体流动的方向。取每一天本区域浓度最大点的经纬度并按时间顺序变换，所有散点以最小二乘法拟合出曲线－渐开线，初始位置即震中(102.08˚E 29.59˚N)。地面断层溢出气异常点位(三角形位置)皆集中于渐开线中心位置。

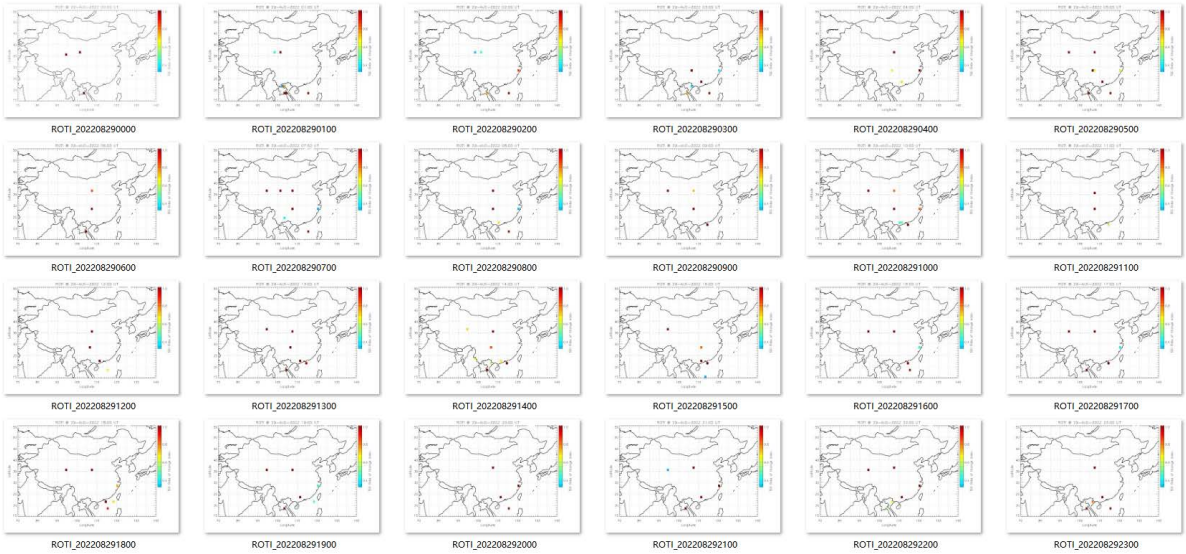
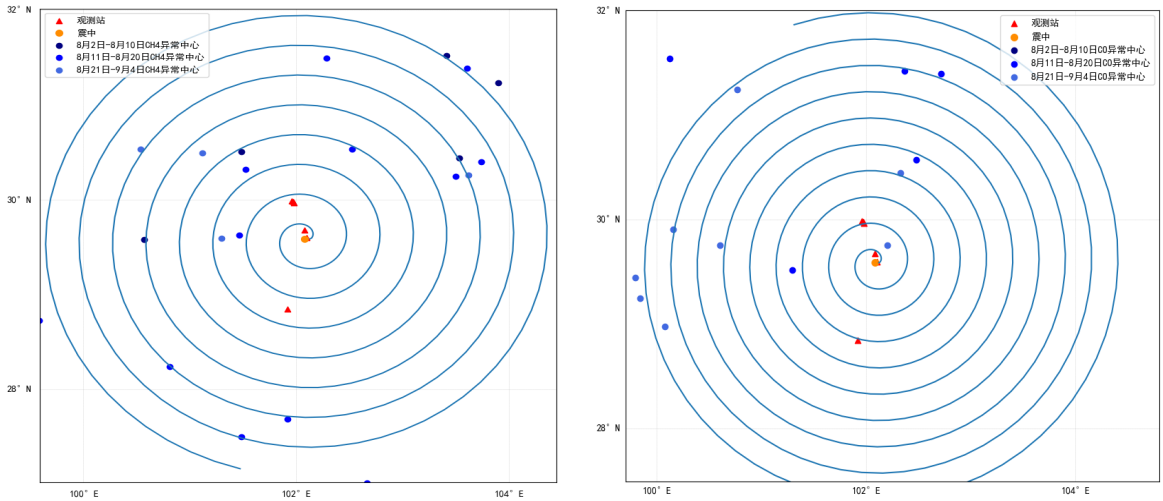


Figure 14. The maximum concentration value point map of CH_4 concentration in AIRS data from August 1 to September 7
图 14. 泸定 6.8 地震 AIRS 数据给出 CH_4 浓度最大点位：8 月 1 日至 9 月 7 日



(a) (b)

Figure 15. The plane trajectory of moving gases fitted by AIRS data; (a) The trajectory of CH_4; (b) The trajectory of CO
图 15. AIRS 数据拟合的气体运动平面轨迹线；(a) CH_4 轨迹线；(b) CO 轨迹线

对比 CH_4 与 CO 的渐开线图件，这两个气体组分不要他们贴合，先有 CH_4，继而出现 CO，时间上就不同步，在风场作用下后出现的 CO 偏开一定距离。这种平面投影的渐开线加上层面高度就是一条立体螺旋线：即取每一天本区域浓度最大点的经纬度和层高，点图分层切片图——浓度最大点的空间移动路径。

3. 泸定 6.8 地震震前断层气释放

3.1. 断裂带气体释放

陈桂华的研究表明：鲜水河断裂存在显著的分段活动特征，不同段落的结构、活动速率、运动性质具有一定的差异[10]。泸定地震发生在雪门坎－磨西段，该段平均水平走向滑动速率约 9.3 mm/a，其北侧是多分支结构的乾宁－康定段，南侧是与安宁河断裂、大凉山断裂重接的田湾－石棉段[11]。

雪门坎－磨西段的西侧是强烈隆升的贡嘎山，隆升速率达到 6.1 mm/a [12]，与周边断裂活动、区域构造变形密切相关，这样一个区域构造转换与分解的变形过程，也是一个断裂的放气和储气的过程模式[13]。

徐锡伟[14]的研究表明：此次地震周围地区的位移场具有以下初步特征：从地表的水平位移场来看，震中东北和西南两侧的物质向外涌出，而东南和西北两侧的物质涌入震中，在发震断层附近则呈现明显的走滑机制。与水平位移场相对应，垂直位移场在震中东北和西南两侧表现为隆升，而东南和西北两侧表现为沉降，位移以水平运动为主。以上特征符合走滑型地震所产生位移场的特征。东南和西北两侧的沉降是断裂拉张表现，有利于创造气体释放的通道。

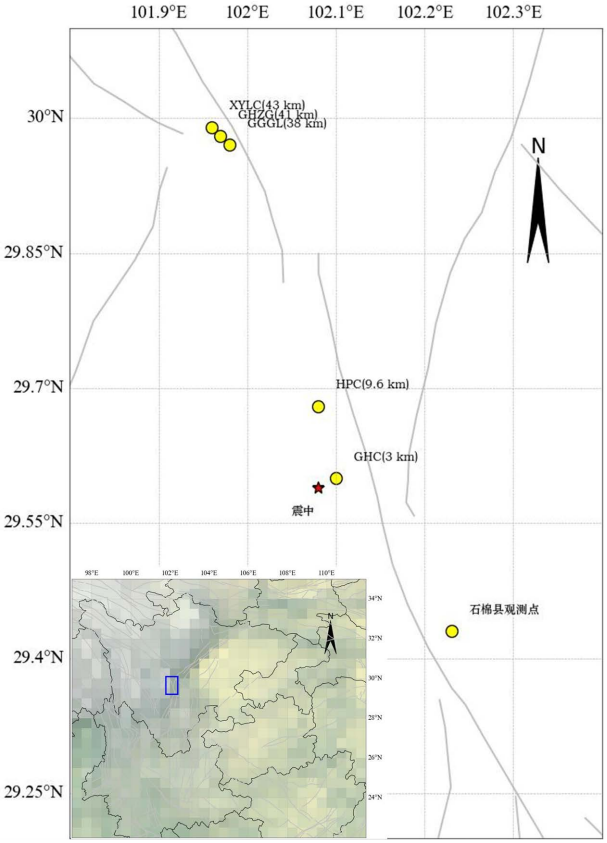


Figure 16. Location map of six fluid geochemical observation sites along the Xianshuihe fault zone

图 16. 鲜水河断裂 6 处流体地球化学观测点位置图

以陈桂华研究资料[15]，按地表气体溢出的空间点位和异常出现得时间先后来看，全部分布在鲜水河断裂震中西北段，应该是先单侧破裂，但震中东南的石棉监测点也发现同时段的气体溢出过程，因此是从单侧向双向破裂的转换可能性加大。田湾－石棉段的活动性明显低于田湾以北。在石棉段的观测站点观测到震前 20 多天，有 CO_2 的剧烈释放。

3.2. 监测点记录释放气体

中国地震局地震预测研究所、四川地震局建设的地球化学观测点明显记录到地震前气体异常，包括断层气观测、温泉观测。其中以老榆林观测点氢气异常最为明显，2022 年 8 月 5 日~9 月 1 日 H_2 浓度异常高达 50 ppm；9 月 1 日后恢复到背景值 2 ppm，9 月 5 日发震(图 16)。

3.3. 地震震源的气体通道－天地同震的物质来源和输送途径

分子状态的气体和离子状态的气体，即地表和大气层平流层的分子状态和电离层的离子状态。本文我们聚焦在大气层的分子状态气体，断层逸出气体各种气体组分溢出时间顺序上有先有后，地面上，H_2 是 8 月 5 日，CO_2 至少是 8 月 15 日出现浓度增加现象。可以这么说，气体是沿着发震断层溢出。那么，这六个气体溢出点(或者说附近区域还有都江堰一个气体溢出点)与卫星空间信息中体现的 162 个信息点，或强烈溢出的 38 个空间点位有什么样的物理联系和化学纽带？这些问题值得关注。

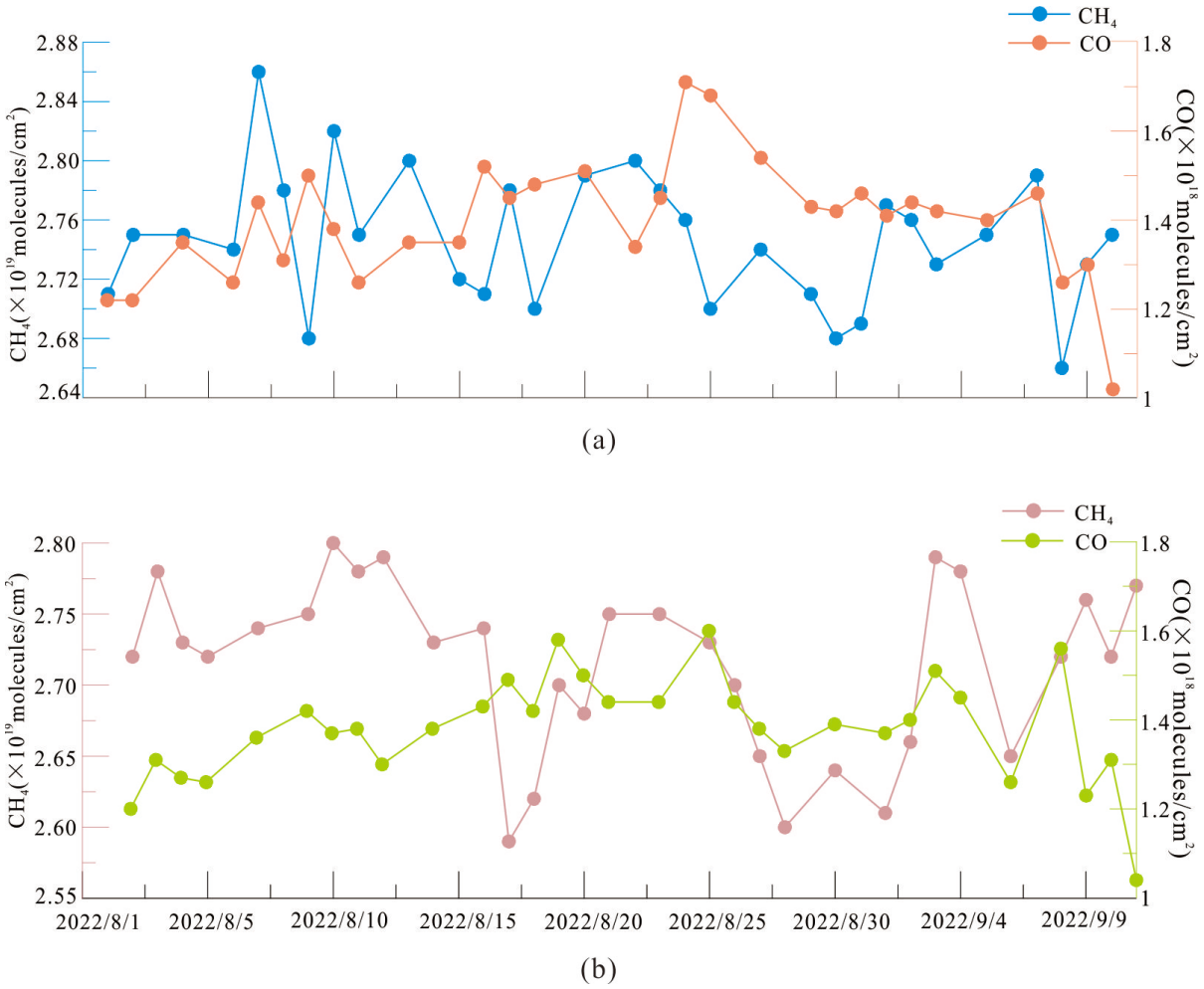


Figure 17. Time series curve of correlation coefficient of XCO & XCH_4; Above: XCO & XCH_4 in ascending orbits; Bottom: XCO & XCH_4 in descending orbits

图 17. XCO & XCH_4 的相关系数时序曲线；上图：升轨状态的 XCO & XCH_4；下图：降轨状态的 XCO & XCH_4

Table 1. Correlation coefficients table for three time periods: background value field of the EQ, before the EQ, and during the EQ

表 1. 平时、震前、震时 3 个时间段的相关系数

时间段	XCO & XCH_4 (升轨)	XCO & XCH_4 (降轨)
背景场(2022.8.1~2022.8.29)	−0.17	−0.20
震前(2022.8.30~2022.9.5)	−0.38	0.93
震时(2022.9.6~2022.9.9)	0.91	0.02

3.4. 从地表到大气层路径化学信息

1) 大气层中的化学反应

$$CH_4 + 4O_2 + 2hv_1 + hv_2 \rightarrow H_2O + CO + H_2 + 2O_3 \tag{1}$$

$$2CO + O_2 = 2CO_2 \tag{2}$$

$$3O_2 \rightarrow 2O_3 \tag{3}$$

断层逸出气体的时序应该是 $CH_4 \rightarrow CO \rightarrow CO_2 \rightarrow O_3$；从卫星高光谱总结的地震案例来看，在 1000 米以下 CH_4 聚集；在 1000~10,000 米之间主要是 CO，在 10,000~30,000 米之间主要是 CO_2；再往高空去是 O_3；达到电离层后是电子、离子状态，TEC 作为指标，见图 17 和表 1。

2) 泸定 6.8 地震 AIRS 高光谱数据体现的 XCO & XCH_4 的相关系数时序曲线，在震前和震时的强相关性给出了有力的证实，见图 17 和表 1。

4. 结论与讨论

4.1. 结论

本文研究表明，来自震源的物质以断层溢出气体为载体携带了大量的震源物质信息，即天地同震过程中是存在着气体传输通道的。

4.2. 讨论

设想可否通过气体浓度的变化预测地震的发生地点，震级的大小和发震时间。

4.2.1. 理论基础

震源体内的气体散射逸出，类似地震波射线反演的方法。

4.2.2. 理论设想

将反射系数换成地震事件，地震子波用气体释放函数来替代，预计会生成根据时间变化的气体浓度曲线，这个曲线可以由这种图解得到。只要反推这个过程，就可以得到地震事件发生的源(位置)即震中，以及发生的时间和地震的大小。

4.2.3. 反推需要解决的问题：

1) 从卫星高光谱数据图解得到各种气体组分每一条气体浓度变化曲线(时间相关)；2) 继而找出哪一种气体组分出现异常变化；3) 该气体组分在大气中的逗留时间是多少；4) 如何排除外源气体的影响，或者如何容错；5) 气体释放函数如何给出，与地震强度震级 M 的关系；与时间的关系(释放的速率以及地层中残余气体的含量)；与区域构造以及岩性的关系(其他地区是否适用)；6) 如何进行反演计算：即给出反演的方法－根据过去的地震记录推导出气体释放函数，假设通过该年的记录得到某一点的气体释放函数。根据 AIRS 的观测结果以及气体释放函数，可以大致推断出地震是否会发生，震级大致多少；对于整个研究区，只要对各点进行运算，哪个点附近最早出现地震特征，用多个点的数据可以求解一下预计震中位置。

千里之行始于足下，要做的事情很多，只要砥砺前行，终有一天会到达理想的彼岸。

基金项目

国家重点研发计划(2019YFC1509203)和院长基金(ZDJ2021-11)联合资助。

参考文献

[1] 龚聪. 日置幸介: 地震预测能够实现[J]. 环球科学, 2018(11): 62-63.

[2] Bogdanov, Y.A. and Hayakawa, M. (2003) Electromagnetic Effects Associated with Regional Seismic Activity in Crimea during the Interval July-August 2002. *Journal of Atmospheric Electricity*, **23**, 57-67. https://doi.org/10.1541/jae.23.57

[3] Hayakawa, M. (2007) WLF/LF Radio Sounding of Ionospheric Perturbations Associate with Earthquakes. *Sensors*, **7**, 1141-1158. https://doi.org/10.3390/s7071141

[4] 蔡军涛, 等. 地震前兆: 电离层 F2 层异常[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 720-728.

[5] 余涛, 毛田, 王云冈, 王劲松. 汶川特大地震前电离层主要参量变化[J]. 科学通报, 2009, 54(4): 493-499.

[6] Vance, E. (2018) Earthquakes in the Sky. *Scientific American*, **319**, 33-37. https://doi.org/10.1038/scientificamerican1018-44

[7] 崔月菊, 杜建国, 陈志, 等. 2010 年玉树 Ms7.1 地震前后大气物理化学遥感信息[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 787-794.

[8] 崔月菊, 杜建国, 李营, 郭秋娜. 探测与 2008 年汶川 Ms8.0 和 2013 年芦山 Ms7.0 地震相关的大气 CH_4 和 CO 异常变化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(5): 1022-1027.

[9] 孙玉涛, 杜建国, 崔月菊, 等. 苏门答腊两次 M > 8.0 地震前后 CO 和 O_3 气体地球化学异常与地面验证[J]. 地震研究, 2014, 37(2): 222-227.

[10] 陈桂华, 安艳芬, 江国焰. 鲜水河活动断裂(雪门坎至石棉段)分布图(1:50000)及说明书[S]. 北京: 地震出版社, 2018.

[11] 陈桂华, 闵伟, 宋方敏, 焦德成, 许洪泰. 从 1786 年磨西地震看地震地表破裂带在不同地貌区的保存[J]. 地震地质, 2011, 33(4): 804-817.

[12] 陈桂华, 徐锡伟, 袁仁茂, 闻学泽, 郑荣章. 川滇块体东北缘晚第四纪区域气候–地貌分析及其构造地貌年代学意义[J]. 第四纪研究, 2010, 30(4): 837-854.

[13] 陈桂华, 徐锡伟, 闻学泽, 王亚丽. 川滇块体北–东边界活动构造带运动学转换与变形分解作用[J]. 地震地质, 2008, 30(1): 58-85.

[14] 徐锡伟, 吴熙彦, 于贵华, 谭锡斌, 李康. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用[J]. 地震地质, 2017, 39(2): 219-275.

[15] Chen, G., Xu, X., Wen, X. and Chen, Y.-G. (2016) Late Quaternary Slip-Rates and Slip Partitioning on the Southeastern Xianshuihe Fault System, Eastern Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, **90**, 537-554. https://doi.org/10.1111/1755-6724.12689