

川滇局部区域甲烷地震监测可行性探索—— 以2021年9月四川泸县M6.0地震为例

王旭^{1,2,3}, 崔静^{1,2,3}, 王林^{1,2,3}, 李晨曦¹, 王钟浩¹,
申旭辉^{2,3}, 姜文亮^{2,3}, 张景发^{2,3}

1. 防灾科技学院, 廊坊 065201;

2. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085;

3. 应急卫星工程与应用应急管理部重点实验室, 北京 100124

摘要: 研究表明地震会引起大气中甲烷气体异常, 本研究选取川滇固定区域, 以2021年9月四川泸县地震为例, 基于美国对地观测卫星AQUA/EOS上搭载的高光谱传感器大气红外探测仪(AIRS)获取的甲烷气体产品, 采用成熟的RST算法开展地震前后甲烷异常信息提取, 并对2008年以来区域内6级以上地震开展甲烷异常指数时序分析。研究结果表明: 甲烷异常与地震有一定对应关系, 主要表现为甲烷打破区域历史时空特征分布规律, 随孕震过程总体呈现出起始增强—异常加强—高峰—衰减—平静的变化特征。异常幅度与震级无明显的关系, 但是异常持续时间可能与震级有关, 即地震引起的甲烷异常并不是偶发的, 具备一定异常持续时间。异常可能对应一定区域内的地震, 后续需综合分析区域内构造地质情况、震级、不同研究区域半径, 开展更深入的研究。川滇局部区域基于遥感手段开展甲烷气体地震异常监测具有一定的可行性, 这与该区域本身富含大量烃类气体有关, 地震的发生会促使地下海量烃类气体沿岩石裂隙、断裂带、不整合面等薄弱地带快速运移、扩散释放至大气中。本研究区域以外不具备油气藏条件、构造地质差异大等情况是否可开展甲烷地震监测, 监测效能等尚需通过大量工作开展深入分析。

关键词: 遥感, 泸县地震, 甲烷, 异常响应, 异常监测

中图分类号: P2

引用格式: 王旭, 崔静, 王林, 李晨曦, 王钟浩, 申旭辉, 姜文亮, 张景发. 2023. 川滇局部区域甲烷地震监测可行性探索——以2021年9月四川泸县M6.0地震为例. 遥感学报, 27(7): 1731–1743

Wang X, Cui J, Wang L, Li C X, Wang Z H, Shen X H, Jiang W L and Zhang J F. 2023. Feasibility exploration of methane seismic monitoring in local areas of Sichuan and Yunnan—Taking the M6.0 earthquake in Luxian, Sichuan in september 2021 as an example. National Remote Sensing Bulletin, 27 (7) : 1731–1743 [DOI: 10.11834/jrs.20232301]

1 引言

地震是地球构造应力的积累、突破岩石弹性破裂临界值并快速释放的过程(崔静等, 2021), 地球内部存在大量流体并不断进行排气作用(孙玉涛等, 2014; 杜乐天和王驹, 1993), 在孕震和发震过程中岩石应力的变化会产生大量贯通地表的裂隙, 使得地下气体沿着断裂带和微小裂隙释放

到大气中(Martinelli和Plescia, 2005), 最常见的主要有CO₂、CH₄、O₂、Rn等(King, 1986; 汪成民和李宣璐, 1991)。随着卫星遥感技术特别是高光谱传感器的发展, 可以利用卫星的高光谱传感器获取大气中O₃、CH₄、CO₂、CO、NO等气体(Tronin, 2006; 程良晓等, 2021; McMillan等, 2005; Xiong等, 2008), 利用卫星获取的O₃、CH₄、CO等气体可用于研究地震活动, 开辟了利用卫星遥感技术

收稿日期: 2022-06-20; 预印本: 2022-12-28

基金项目: 高分辨率对地观测重大专项(编号:31-Y30F09-9001-20/22-02); 国家重点研发计划(编号:2021YFB3901203); 亚太地震二期项目

第一作者简介: 王旭, 研究方向为遥感地震监测。E-mail: 2381423128@qq.com

通信作者简介: 崔静, 研究方向为卫星地震监测预测技术与方法。E-mail: cuijing99@163.com

对地震异常监测的新途径。

已有研究表明, 烃类气体中甲烷气体与地震活动有着密切的关系, 构造区范围内甲烷的释放浓度能够反应构造活动的强度状况, 是地震监测的重要监测对象 (Toutain 和 Baubron, 1999)。2008年5月12日的汶川地震和2013年4月20日芦山地震 (王杰等, 2013; 崔月菊等, 2016a, 2016b)、2015年4月15日内蒙古自治区阿拉善左旗地震 (李新艳等, 2019)、2017年8月8日四川九寨沟地震、2019年4月24日西藏自治区墨脱地震和2020年6月26日新疆维吾尔自治区于田地震 (姜莉等, 2021) 在震前均出现了甲烷异常, 表明地震活动的出现与甲烷异常有关 (王杰等, 2015)。

四川盆地天然气分布很广, 是中国著名的油气盆地之一, 其产生的天然气组分主要是烃类气体 (黄籍中, 1984)。那么是否可以基于甲烷的时空分布特征开展川滇区域地震监测是一个重要问题。本研究以2021年9月16日泸县地震为例, 开展甲烷异常信息提取, 分析其时空分布特征, 并与区域历史震例开展对比分析, 探讨其与地震活动性的关系。本研究将有助于进一步探讨基于卫星遥感开展川滇区域甲烷气体地震异常监测的可行性。

2 地震地质概况

2021年9月16日四川省泸州市泸县发生 Ms6.0 地震, 发生余震37次, 震中位于 29.20°N , 105.34°E , 震源深度10 km。本次地震是2019年6月17日长宁 Ms6.0 级地震后, 发生在四川盆地东南边缘的又一次中强震。震源机制结果显示泸县此次地震机制与2008年汶川地震机制类似同属于逆冲型破裂 (易桂喜等, 2021)。区域地震构造图显示本次地震震构造更靠近四川盆地东南侧的华蓥山断裂带 (刘培玄和易佳, 2021)。华蓥山断裂带是分布于华南地块西北部、四川东部的一条重要的断裂带。该区域布格重力场显示了四川盆地具有相对比较完整的地壳结构与较高的地壳密度 (姜文亮和张景发, 2011)。华南地块西临青藏高原、西南邻滇缅块体, 华蓥山断裂带是刚性华南地块内部活动性相对较强的一条断裂带。对华南块体内部和周边形变场分析, 可知其西北边界、西南边界受青藏高原推挤力 (张静华等, 2005)。

华蓥山断裂带由宜宾起, 向北东经荣昌、合

川、邻水至达县北部, 全长约460 km, 为川中台拱与川东陷褶束两个三级构造单元的边界断裂。断裂走向 45° 东, 断面总体倾向南东, 倾角 30° — 70° , 具右行逆冲性质, 从北至南由许多小断裂带组成。以合川、邻水为界, 该断裂带分为南、中、北三段 (盛强和谢新生, 2010; 王赞军等, 2018)。对历史震例统计发现, 南段小震沿断裂带呈密集、带状分布特征, 中段和北段地震沿断裂带零星分布, 进一步表明南西段活动性强于北东段。此次泸县地震震中就位于南西段。1985年至今, 华蓥山断裂带表现出5.0级以上地震“平静—活跃”的时段分布特征, 并且近20年以来, 该断裂带5.0级以上地震发生过15次。华蓥山断裂带作为四川盆地内规模最大的断裂带, 其西侧的川中地区具有变形深、刚性块体硬化程度高等特点, 同样具有较强的孕育中强震的能力 (赵从俊, 1984)。研究区构造地质分布如图1。

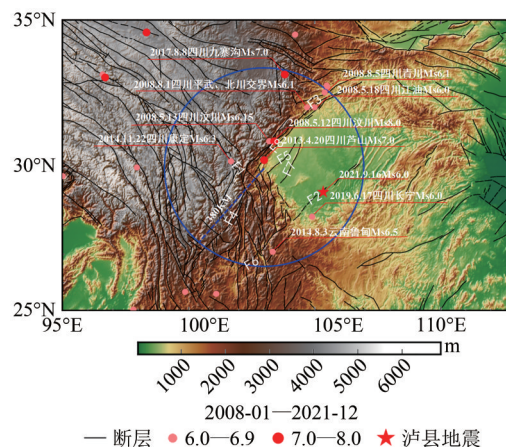


图1 泸县地震震中与区域构造地貌图 (F1: 鲜水河断裂; F2: 华蓥山断裂; F3: 映秀—北川断裂; F4: 马头山断裂; F5: 成都—德阳断裂; F6: 宁会断裂; F7: 龙泉山西缘断裂; F8: 灌县—安县断裂)

Fig. 1 Luxian earthquake epicenter and regional tectonic geomorphology map (F1: Xianshuihe fault; F2: Huayingshan fault; F3: Yingxiu—Beichuan fault; F4: Matoushan fault; F5: Chengdu—Deyang fault; F6: Ninghui fault; F7: West margin of Longquanshan fault; F8: Guanxian—Anxian fault)

3 数据和方法

1990年以来, 许多国家的航天部门, 如美国航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration)、欧洲航天局等, 陆续发射了许多颗大气探测卫星获取 CH_4 浓度。其根据传感器波段设置不同, 用于反演 CH_4 产品的特性亦不同。相较

于其他CH₄卫星产品，NASA提供的搭载于美国对地观测卫星AQUA/EOS上的高光谱传感器大气红外探测仪AIRS (The Atmosphere InfraRed Sounder) 发射较早，数据积累多，同时具有较高的光谱分辨率和时间分辨率，每天扫描全球2次，空间覆盖度高。且已有研究人员利用飞机观测开展对该探测产品的真实性检验，证明AIRS可以探测得到高精度的甲烷产品，可用于分析研究大气中甲烷分布和传输规律 (Xiong等, 2008, 2009a, 2009b; 2010a, 2010b)。前人基于AIRS产品开展了地震事件分析，证明其可用来开展地震异常信息的提取 (崔月菊等, 2016a, 2016b; Cui等, 2017, 2019)。因此本研究主要选取NASA官网第六版本三级标准网格产品的8天尺度产品 ([https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/AIRS3ST8_006/summary?keywords=%22AIRS%22/\[2021-12-20\]](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/AIRS3ST8_006/summary?keywords=%22AIRS%22/[2021-12-20])) 中的400 hPa甲烷浓度混合比观测值做为参量。其空间分辨率为1°×1° (Susskind等, 2003)。

现阶段基于卫星遥感的异常提取算法主要包括4大类：(1) 目视解译 (Qiang等, 1991, 1992; Ye等, 1995; 徐秀登等, 2000); (2) 基于差值分析的异常提取算法，典型算法包括震前震后亮温差值法、断裂带内外亮温差值法、涡度法等 (Saraf和Choudhury, 2005; Panda等, 2007; 陈梅花等, 2007); (3) 基于信号分析的异常提取算法，典型算法有小波、功率谱、夜间热梯度 (NTG) 算法等 (陈顺云, 2006; 陈顺云等, 2006; 王亚丽等, 2008; 张元生等, 2010; Saradjian和Akhoondzadeh, 2011; Luca等, 2013; 张璇等, 2013a, 2013b; 郭晓等, 2014); (4) 基于背景场分析的异常提取算法，典型算法包括历年同期偏移指数法、RST算法等 (Genzano等, 2007, 2009; Pergola等, 2010; Tramutoli等, 2013)。其中RST算法应用相对成熟，且国内外基于气体地震异常算法多采用该方法 (Cui等, 2017, 2019; 李新艳等, 2019; 姜莉等, 2021)，选取该方法有助于结果的对比分析。学者采用RST算法针对热异常与地震相关性开展了统计分析研究，得到了较为积极的结果 (Eleftheriou等, 2016)。因此本研究选取RST算法开展地震异常提取。

RST算法计算公式如下：

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

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

$$ALICE(x, y, t) = (G(x, y, t) - G_{\text{ref}}(x, y, t)) / \sigma(x, y, t) \quad (3)$$

式中， i 为年份， N = 年数， $G_i(x, y, t)$ 指在观测时间 t ，对应经纬度为 (x, y) 处的甲烷浓度混合比值， $G_{\text{ref}}(x, y, t)$ 指对应时间 t ，相应经纬度 (x, y) 处甲烷浓度混合比的背景值，这里主要指对应时间 t 和位置 (x, y) 的历史 N 年(N)的均值。背景场可以部分消除季节变化、地表植被等自然源的影响，有效捕捉地震等突变信息，在一定程度上减少“非震异常”，为地震异常的提取提供依据，减少地震信息的误判和漏判。本研究选取历史5年，即 $N = 5$ ，对应2016年—2020年8天尺度数据计算发震年2021年对应时间 t 的均值作为背景场，若历史5年的8天起始时间不同，例如2021-04-14，针对该时间，认为历史5年内包含该时间的前4天—后3天都认为是2021-04-14历史5年的背景场数据。 $ALICE(x, y, t)$ 为异常指数，由于气候气象、地形地貌和地表覆盖等因素的影响，观测参数存在周期变化和随机变化 (标准偏差)，变化量超过不同倍的标准偏差，异常可靠度不同。与地震有关的异常一般认为出现在地震前后的震中、断裂带交汇处或者沿断裂带呈线性分布，置信水平取 $+2\sigma$ ，即当 $ALICE > 2$ ，异常可靠性达到95.44% (崔月菊等, 2016b)。

4 数据结果处理与分析

4.1 CH₄参考场特征

基于式 (1) 计算的甲烷背景场如图2，结果表明，甲烷浓度混合比具有明显的时空分布特征。整体上表现为4—7月份低，8月份开始增加且高值持续到12月份，之后开始表现出减弱的趋势。不同季节分布中青藏高原及板块构造边界处均表现为高值。其中青藏高原高值区可能与多年冻土有关 (Yagi和Minami, 1990; Khalil等, 1991; Saarnio等, 1998, 2000; Henckel等, 2000)。四川盆地天然气分布很广，板块和构造边界为气体运移提供了很好的通道，因此板块构造边界处的高值可能是由于地球气体排放造成的 (IPCC, 2013)。图2显示，7月下旬四川盆地甲烷浓度开始增加，与稻田排放和季节性温度升高有关，高温会促使气体

大气对流输送增强,且稻田甲烷排放量峰值通常在夏季(Schütz等,1990;Yagi和Minami,1990;Xiong等,2010a;张定媛和廖宏,2015)。相关研

究表明秋冬季节持续高值与生物质燃烧有关,四川盆地的秸秆燃烧主要集中在9—12月,因此秋冬季甲烷浓度较高(Wu等,2020)。

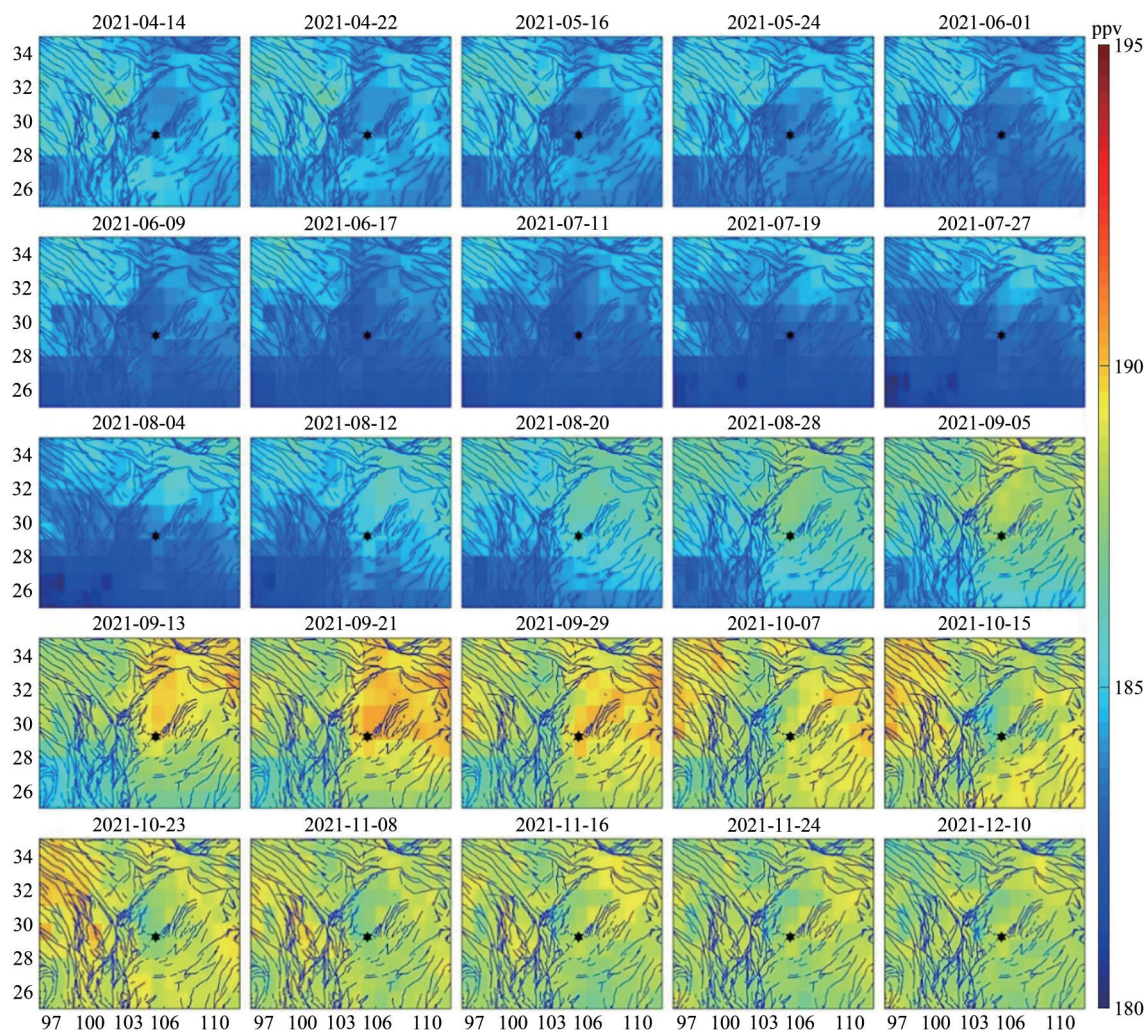


图2 2021年4—12月8天尺度400 hPa CH₄背景场分布

Fig. 2 Distribution of 400 hPa CH₄ background field at 8-day scale from April to December 2021

4.2 地震前后甲烷异常时空响应特征

图3的甲烷异常指数时空分布图显示,随着地震的发生,甲烷的分布打破了背景场局部区域稳定的时空分布特征。震前3个月震中附近出现大面积甲烷浓度升高现象,6月1日开始沿华蓥山断裂、青川断裂及其附近区域出现小范围的高值积累区域,后续减弱,震前约2个月即7月11日开始高值区域主要分布在鲜水河断裂、映秀—北川断裂一带及其附近区域即研究区西部和北部,随后高值区域开始大面积增加并且向震中区域和华蓥山断裂快速聚集至7月27日高值积累区域在研究区面积达到最大此时几乎整个研究区都为高值区域,

随后的一个月在震中区域和华蓥山断裂高值持续存在,高值积累从7月19日至8月28日在震中持续存在了41天,震前11天,高值开始向华蓥山断裂两侧及附近地区展布并且在9月13—20日的发震周期内高值面积有所减小,主要分布在华蓥山断裂附近地区和研究区西部,发震之后高值面积快速减小但在震中区域及研究区的小部分地区持续存在,至10月23日高值区域彻底消失。此次泸县地震甲烷异常呈现出起始增强—异常加强—高峰—衰减—平静的特征。

进一步分析泸县地震前后甲烷浓度的时序变化特征,计算图3中不同时间段内整个研究区甲烷

异常指数均值,结果见图4,7月11日开始异常指数快速升高,并持续多日到发震周期,后续逐步减弱。数值上表现为震前逐步大于2,震后小于2,整体趋势同样表现为:起始增强—异常加强—高峰—衰减—平静的特征。研究区2016年—2020年的甲烷浓度变化结果显示(图5),2016年—2020年

非震年,甲烷浓度分布趋势一致,2021年发震年打破了前几年的趋势分布,7月份开始,甲烷浓度明显高于历史五年,整体趋势表现为激增(图5矩形框),震后又逐渐恢复平静,与历史同期基本吻合。进一步证明,甲烷激增可能与地震有关。

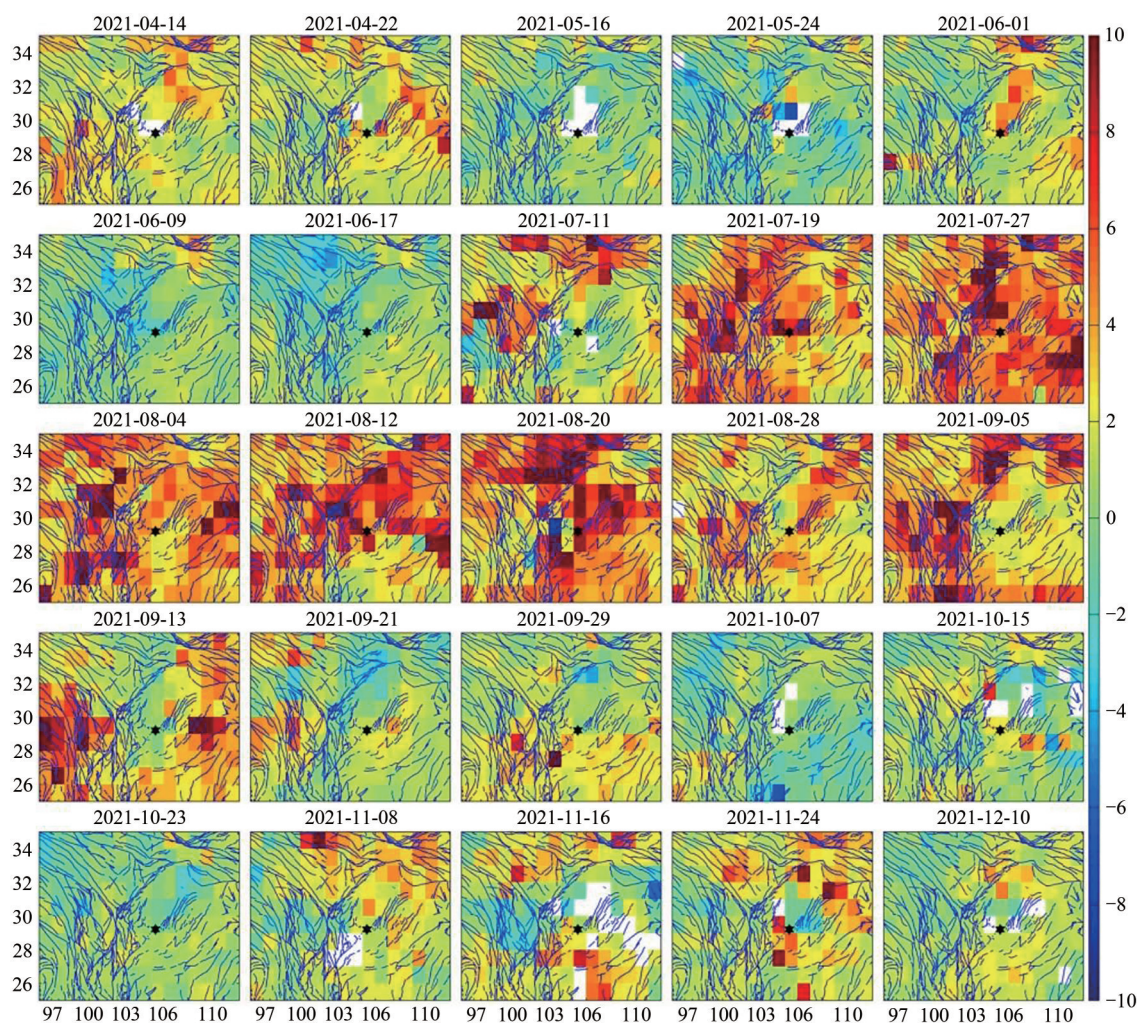


图3 四川泸县 Ms6.0地震前后甲烷异常指数时空分布图

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of methane anomaly index before and after the Ms6.0 earthquake in Luxian, Sichuan

4.3 区域历史地震对比分析

为进一步研究基于甲烷特征的区域地震异常特征,本研究选取研究区2008年以来6.0级以上地震为研究对象,分析区域甲烷异常时序特征。2008年1月份以来到发震日,研究区6.0级以上地震共计21个,主要地震目录如下表1。根据 Dobrovolsky 等人(1979)提出的机械/热/电磁前兆的圆形大小区域与最终地震震级之间的经验关系 $R_d = 10^{0.43M}$ (M 为震级),选定以研究区中心位置 (103°E , 30°N) 为中心,380 km 为半径,圆内地震有11个(图1所

示,见表1斜体),其中5月12日当日的汶川余震以主震为主合并为一个分析。区域中心 (103°E , 30°N) 附近历史上发生了汶川8.0地震、芦山7.0地震两次7级以上地震,这两次地震研究区范围内甲烷都有一定的异常响应(崔月菊等,2016a, 2016b; Cui等,2017, 2019),且研究并不单纯的针对泸县地震分析,旨在后续进一步探讨川滇局部区域地震甲烷监测的可行性,因此选取了该地理位置为中心。

图6甲烷异常指数时间序列图结果显示,汶川

地震震前1个月震后4个月异常指数持续高值,表现为4月10日起异常指数均大于1,且86%的异常指数大于2(18/21,图6中A区域);芦山地震异常时间出现较早,2011年5月13日开始异常指数开始大于1,且后续到发震日异常指数大于1占比75%(67/89,图6中B区域),异常指数大于2占比虽然不高,但是震前两个月有一个突增。芦山地震甲烷异常指数出现这种现象可能与汶川地震有关,据报道,汶川地震和芦山地震均位于同一大角度逆冲断层上,且两次主震震中距离仅为85 km(刘杰等,2013)。龙门山断裂在汶川地震发展过程中处于闭锁状态,地震发生前,由于弹性变形极限,死锁段不能带来变形(江在森等,2009;Wang等,2011;Wu等,2015),气体上涌通道少,地下

气体排放困难,因此异常出现时间较晚。汶川地震及其余震后,地表出现大量裂隙,为气体涌出提供了通道,随着压力的增加,气体从断裂带的岩石裂隙中逸出,使得该地区持续5年异常指数大于1占比大,且长时间的不间断排放使得突增(异常指数大于2)变少。因此,芦山地震前异常指数虽然值不高,但是大于1出现早,且持续时间长。图6中C、D和E区域对应的云南鲁甸地震、四川康定地震、四川九寨沟地震和四川长宁地震,类似芦山地震,震前异常指数持续大于1出现的频率高,且发震前或发震后有一个突增。图6中F区域对应本文上述分析的泸县地震,震前2个月出现异常突增(异常指数大于2),且持续时间长。

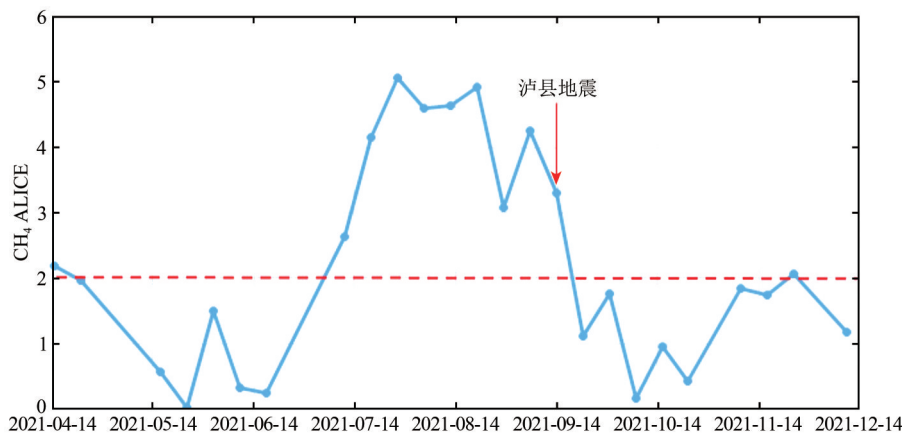


图4 四川泸县 Ms6.0地震前后甲烷异常时序图

Fig. 4 Times series diagram of methane anomalies before and after the Ms6.0 earthquake in Luxian, sichuan

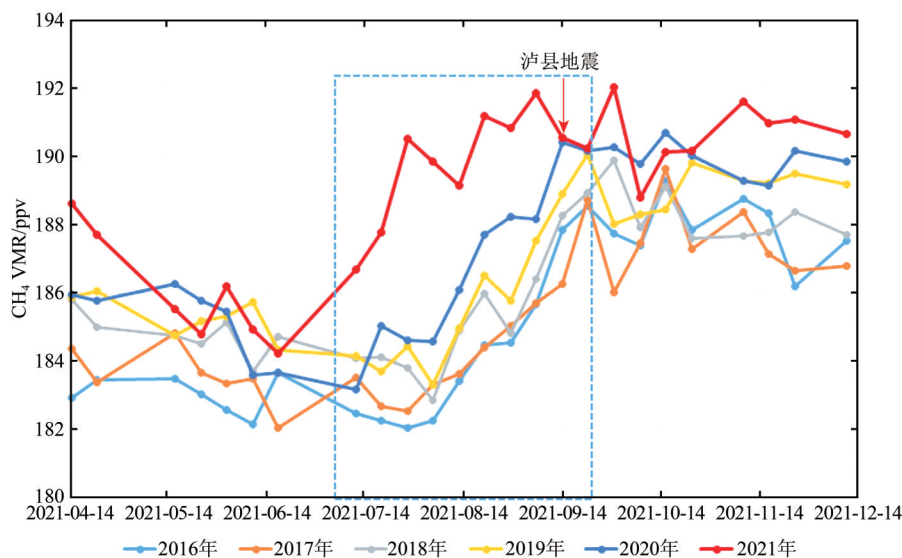


图5 研究区2016年—2020年甲烷浓度含量对比

Fig. 5 Comparison of methane concentration in the study area during 2016—2020

表1 2008年以来区域内6.0级以上地震目录
Table 1 Catalogue of earthquake of Ms ≥ 6.0 in the region since 2008

发震日期	震中位置	震级/Ms	异常出现时间	异常幅度	异常持续时间
2008-05-12	30.95N,103.40E 四川汶川县	8.00			
2008-05-13	30.95N,103.20E 四川汶川县	6.15			
2008-05-18	32.10N,105.00E 四川江油市	6.00			
2008-05-25	32.60N,105.40E 四川青川县	6.04	震前一个月	异常指数均大于1, 且86%的异常指数大于2	五个月
2008-07-24	32.83N,105.48E 四川青川县	6.04			
2008-08-01	32.10N,104.70E 四川平武、北川交界	6.10			
2008-08-05	32.80N,105.50E 四川青川县	6.10			
2009-07-09	25.60N,101.10E 云南姚安县	6.00	震前两个月	大于1.5	不持续
2010-04-14	33.10N,96.70E 青海玉树市	7.10	震前半个月	—	不持续
2013-04-20	30.30N,103.00E 四川芦山县	7.00	震前三年其中 震前两个月突增	2011年5月13日开始异常指数 开始大于1,且后续到发震日 异常指数大于1占比75%	三年
2013-07-22	34.52N,104.23E 甘肃岷县、漳县交界	6.60	震前半个月	大于1	不持续
2013-08-12	30.05N,97.96E 西藏左贡县	6.10	震前一个月	大于1	不持续
2014-05-30	25.03N,97.82E 云南盈江县	6.10	震前两个月	大于1	不持续
2014-08-03	27.10N,103.34E 云南鲁甸县	6.50	震前一个半月	大于1	两个月
2014-11-22	30.26N,101.69E 四川康定市	6.30	震前48天	大于1	两个月
			其中震前一周	大于1.5	约一个月
2017-08-08	33.20N,103.82E 四川九寨沟县	7.00	震前半年,其中震前1个月 持续大于1持续升高	震前半年异常指数大于1占比 大,且震前1个月持续增加	一个半月
2017-11-18	29.75N,95.02E 西藏米林县	6.90	震前一个月	大于1	一个半月
2019-06-17	28.34N,104.90E 四川长宁县	6.00	震前六个月其中震前一个月突增	大于1,震前一个月持续大于1.5	六个月
2021-05-21	25.67N,99.87E 云南漾濞县	6.40	震前两个月	大于2	不持续
2021-05-22	34.59N,98.34E 青海玛多县	7.40			
2021-09-16	29.20N,105.34E 四川泸县	6.00	震前两个月	大于2	三个月

注:斜黑体为以研究区中心位置(103°E,30°N)为中心,380 km为半径确定的圆形区域内的6级以上地震。

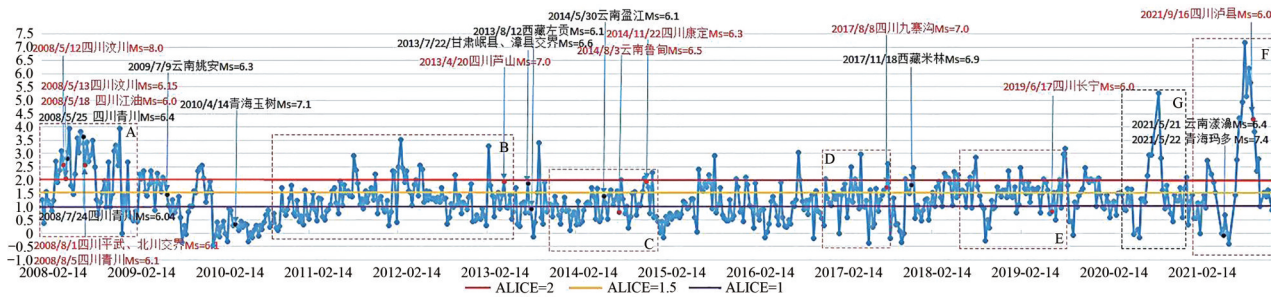


图6 区域甲烷异常指数时序与地震对应关系图
Fig. 6 Correspondence diagram of regional methane anomaly index time series and earthquakes

研究区中心位置380 km以外6.0级以上地震震前甲烷的异常幅度和异常持续时间明显低于研究区中心位置380 km以内6.0级以上地震震前的甲烷异常幅度和持续时间,初步分析造成该现象的原因可能为研究区边缘的地震气体扩散运移偏移了研究区位置亦或为380 km以外区域离油气藏远,

“源”相对较弱,导致研究区只存在部分甲烷,计算出的甲烷异常指数相对较低,甲烷异常持续时间相对较短。例如2010年4月14日青海玉树 Ms7.1地震,震前出现明显甲烷升高,但甲烷异常指数只达到了0.9,初步分析可能与2010年89% (40/45)的甲烷异常数值均小于1,整体甲烷数值偏低有

关。但是, 甲烷异常指数出现高值, 且有一定的持续时间, 并不一定意味着 380 km 以内一定出现 6.0 级以上地震, 例如图 6 中 G 区域, 所以可能存在一部分虚报。也说明固定区域进行研究对于范围内相似构造背景的地震适合, 而背景差异较大的地震不一定完全适合。后续研究中需要充分考虑构造背景的差异性, 结合油气藏分布等, 开展更深入的研究, 进一步剖析地震甲烷异常幅度和持续时间不同的原因。

地震甲烷异常与四川盆地深部的天然气微渗漏有关。四川盆地是中国的主要天然气产地之一, 现存的常规气藏主要有震旦系、寒武系、石炭系、二叠系—三叠系碳酸盐岩, 其天然气主要成分均为甲烷(赵文智等, 2021; 文龙等, 2021), 目前已探明天然气储量达 10^{12} m^3 (焦方正等, 2021)。油气藏的形成条件包括烃源岩、储层、圈闭、运移等条件, 研究发现天然气成藏与走滑断层密切相关, 走滑断层对于天然气圈闭和运移具有一定的控制作用; 由于深部烃源岩和碳酸盐岩储层之间并不相通, 走滑断层在纵向上可以连接深部烃源岩和天然气储层, 有助于天然气运移; 横向上走滑断层可以连通深部发育烃源岩的裂槽, 有利于形成天然气藏; 同时走滑断层可以提高碳酸盐岩的孔隙度和渗透率, 更有利于形成优质储层(焦方正等, 2021)。国内发现的与走滑断层相关的油气藏有准噶尔盆地西北缘油气藏、塔里木盆地台盆区油气藏、柴达木盆地油气藏(邵雨等, 2011; 付锁堂等, 2015; 韩剑发等, 2019), 基于四川盆地分布有大量的走滑断层, 也有学者提出四川盆地的天然气成藏和走滑断层密切相关(焦方正等, 2021)。由于地壳本身板块运动和走滑断层的影响使得研究区地下天然气沿着深部断裂运移至原始碳酸盐岩储层中, 随着大量天然气运移至原始储层中, 走滑断层会改善碳酸盐岩的孔隙度和渗透率, 使其沿断裂形成高孔隙度和高渗透率的优质储层, 此时大量天然气会沿走滑断层运移至孔渗条件较好、储层条件较好的致密碳酸盐岩储层中, 形成天然气的圈闭, 随着时间的推移, 圈闭内储存的天然气逐渐增多, 使得圈闭外的岩石弹性形变增加, 但因为区域构造应力场和刚性岩石块体弹性形变极限限制了研究区地下圈闭中的大量天然气溢出地表。地震会促使地下圈闭中的大量天然气释放至大气中, 随着地震

的发生、构造应力的逐渐加强使得地球内部流体压力增大, 断裂带附近的岩石出现破裂, 岩石裂隙逐渐增加, 使得研究区地下圈闭中的天然气沿岩石裂隙、断裂带、不整合面等薄弱地带快速运移、扩散释放至大气中(岳中琦, 2013; 焦方正等, 2021), 地球排气量增大, 导致震中及其附近的天然气微渗漏增强, 使得研究区大气甲烷浓度逐渐升高, 形成地震甲烷异常。

5 结 论

本研究选取川滇固定研究区, 基于遥感技术, 利用 AIRS 反演的甲烷产品数据, 对 2021 年 9 月 16 日四川泸县地震对流层甲烷的时空分布特征进行了研究, 并以此为例, 结合区域内历史多年 6.0 级以上地震, 探讨分析了地震前后甲烷异常的时序特征和区域地震的发生机制, 得到几点认识, 总结如下。

(1) 研究区甲烷背景场与地形地貌相关, 且具有明显的时空分布特征。时间上随季节变化造成生物多样性和温度的差异, 甲烷浓度出现规律性变化; 空间变化主要与地形地貌有关, 与地震相关的特性表现为断层和板块构造交界处甲烷浓度高。

(2) 甲烷异常与地震有一定对应关系, 主要表现为打破区域历史甲烷时空特征分布规律, 随孕震过程总体呈现出一定的变化特征: 起始增强—异常加强—高峰—衰减—平静。

(3) 甲烷异常幅度与震级无明显关系, 但异常持续时间可能与震级有关, 即地震引起得甲烷异常并不是偶发的, 具备一定异常持续时间。本研究发现: 固定区域内异常幅度表现为大于 2 异常持续时间至少为 1 个月, 异常幅度大于 1, 持续时间 1.5 个月以上。

(4) 选取的研究区范围内, 以中心 380 km 为半径显示, 380 km 半径内的地震与区域甲烷异常对应关系更好: 地震甲烷异常多出现于震前, 并持续多日至发震周期, 震后仍有一定的持续时间, 但并不能说明出现持续甲烷异常一定会有地震发生, 如图 6 中 G 区域, 可能存在部分虚报。本研究仅考虑了 6.0 级以上地震, 380 km 半径, 且对区域内构造分布等未做细致分析, 后续需综合分析构造地质情况、震级、不同研究区域半径对比, 开展更深入的研究。

(5) 川滇局部区域基于遥感手段开展甲烷气

体地震异常监测具有一定的可行性。该局部区域

本身富含大量烃类气体，地震的发生会促使地下海量烃类气体沿岩石裂隙、断裂带、不整合面等薄弱地带快速运移、扩散释放至大气中。本研究初步表明该局部区域进行地震甲烷异常研究对于范围内相似构造背景的地震适合，由于研究区域的局限性，后续研究中会充分考虑构造背景的差异性，结合油气藏分布等，在该局部区域以外的区域开展更深入的研究，进一步探讨地震甲烷异常监测的可行性。

参考文献(References)

- Chen M H, Deng Z H, Ma X J, Tao J L and Wang Y. 2007. Application of the inside-outside temperature relation analysis method in study on satellite infrared anomalies prior to earthquake. *Seismology and Geology*, 29(4): 863-872 (陈梅花, 邓志辉, 马晓静, 陶京玲, 王煜. 2007. 断裂带内外温差法在震前红外异常研究中的应用. *地震地质*, 29(4): 863-872) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2007.04.017]
- Chen S Y, Liu P X, Liu L Q, Ma J and Chen G Q. 2006. Wavelet analysis of thermal infrared radiation of land surface and its implication in the study of current tectonic activities. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(3): 824-830 (陈顺云, 刘培洵, 刘力强, 马瑾, 陈国强. 2006. 地表热红外辐射的小波分析及其在现今构造活动研究中的意义. *地球物理学报*, 49(3): 824-830) [DOI: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.03.026]
- Chen S Y. 2006. A Study on the Quantitative Thermal Infrared Remote Sensing Method for Extracting Information of Current Tectonic Activity. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 1-62 (陈顺云. 2006. 提取现今构造活动信息的定量热红外遥感方法研究. 北京: 中国地震局地质研究所: 1-62)
- Cheng L X, Tao J H, Yu C, Zhang Y, Fan M, Wang Y P, Chen Y L, Zhu L L, Gu J B and Chen L F. 2021. Tropospheric NO₂ column density retrieval from the GF-5 EMI data. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(11): 2313-2325 (程良晓, 陶金花, 余超, 张莹, 范萌, 王雅鹏, 陈元琳, 朱莉莉, 顾坚斌, 陈良富. 2021. 高分五号大气痕量气体差分吸收光谱仪对流层NO₂柱浓度遥感反演研究. *遥感学报*, 25(11): 2313-2325) [DOI: 10.11834/jrs.20210303]
- Cui J, Ma W Y, Yao Q, Zhao J, Lu X and Ren J. 2021. Prediction and tracking of OLR change in the sequence earthquakes in Xinjiang, Jiashi in January 2020. *Earthquake Research In China*, 37(1): 33-42 (崔静, 马未宇, 姚琪, 赵静, 卢显, 任静. 2021. 2020年1月新疆伽师序列地震OLR变化跟踪. *中国地震*, 37(1): 33-42) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-4683.2021.01.004]
- Cui J, Shen X H, Zhang J F, Ma W Y and Chu W. 2019. Analysis of spatiotemporal variations in middle-tropospheric to upper-tropospheric methane during the Wenchuan Ms=8.0 earthquake by three indices. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(12): 2841-2854 [DOI: 10.5194/nhess-19-2841-2019]
- Cui Y, Ouzounov D, Hatzopoulos N, Sun K, Zou Z and Du J. 2017. Satellite observation of CH₄ and CO anomalies associated with the Wenchuan Ms8.0 and Lushan Ms7.0 earthquakes in China. *Chemical Geology*, 469: 185-191 [DOI: 10.1016/j.chemgeo.2017.06.028]
- Cui Y J, Du J G, Chen Y, Liu L, Liu H, Yi L and Sun F X. 2016a. Increasing of CO and CH₄ gas emission at Longmenshan fault zone before and after Wenchuan Ms8.0 Earthquake. *Journal of Seismological Research*, 39(2): 239-245 (崔月菊, 杜建国, 陈杨, 刘雷, 刘红, 易丽, 孙凤霞. 2016a. 汶川Ms8.0地震前后龙门山断裂带CO和CH₄排气增强. *地震研究*, 39(2): 239-245) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0666.2016.02.009]
- Cui Y J, Du J G, Li Y and Guo Q N. 2016b. Detecting anomalies of atmospheric total column CH₄ and CO related to the 2008 Wenchuan Ms8.0 and 2013 Lushan Ms7.0 Earthquakes. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(5): 1022-1027 (崔月菊, 杜建国, 李莹, 郭秋娜. 2016b. 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. *矿物岩石地球化学通报*, 35(5): 1022-1027) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.05.023]
- Dobrovolsky I P, Zubkov S I and Miachkin V I. 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pageoph*, 117, 1025-1044 [DOI: 10.1007/BF00876083]
- Du L T and Wang J. 1993. Gas geodynamics: a new direction of geoscience study. *Advances in Earth Sciences*, 8(6): 66-73 (杜乐天, 王驹. 1993. 气体地球动力学——一个重要的研究新方向. *地球科学进展*, 8(6): 66-73)
- Eleftheriou A, Filizzola C, Genzano N, Lacava T, Lisi M, Paciello R, Pergola N, Vallianatos F and Tramutoli V. 2016. Long-term RST analysis of anomalous TIR sequences in relation with earthquakes occurred in Greece in the Period 2004-2013. *Pure and Applied Geophysics*, 173(1): 285-303 [DOI: 10.1007/s00024-015-1116-8]
- Fu S T, Ma D D, Guo S J and Cheng F. 2015. Strike-slip superimposed Qaidam basin and its control on oil and gas accumulation, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42(6): 712-722 (付锁堂, 马达德, 郭召杰, 程丰. 2015. 柴达木走滑叠合盆地及其控油气作用. *石油勘探与开发*, 42(6): 712-722) [DOI: 10.11698/PED.2015.06.03]
- Genzano N, Aliano C, Filizzola C, Pergola N and Tramutoli V. 2007. A robust satellite technique for monitoring seismically active areas: the case of Bhuj-Gujarat earthquake. *Tectonophysics*, 431(1/4): 197-210 [DOI: 10.1016/j.tecto.2006.04.024]
- Genzano N, Aliano C, Corrado R, Filizzola C, Lisi M, Mazzeo G, Paciello R, Pergola N and Tramutoli V. 2009. RST analysis of MSG-SEVIRI TIR radiances at the time of the Abruzzo 6 April 2009 earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(6): 2073-2084 [DOI: 10.5194/nhess-9-2073-2009]
- Guo X, Zhang Y S, Wei C X, Zhong M J and Zhang X. 2014. Medium wave infrared brightness anomalies of Wenchuan 8.0 and Zhongba 6.8 Earthquakes. *Acta Geoscientia Sinica*, 35(3): 338-344 (郭晓, 张元生, 魏从信, 钟美娇, 张旋. 2014. 汶川8.0级和仲巴6.8级地震中波红外热辐射异常. *地球学报*, 35(3): 338-344) [DOI: 10.3975/cagsb.2014.03.09]
- Han J F, Su Z, Chen L X, Guo D S, Zhang Y T, Ji Y G, Zhang H F and Yuan J Y. 2019. Reservoir-controlling and accumulation-control-

- ling of strike-slip faults and exploration potential in the platform of Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 40(11): 1296-1310 (韩剑发, 苏洲, 陈利新, 郭东升, 张银涛, 吉云刚, 张慧芳, 袁敬一. 2019. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储控藏作用及勘探潜力. *石油学报*, 40(11): 1296-1310) [DOI: 10.7623/syxb201911002]
- Henckel T, Roslev P and Conrad R. 2000. Effects of O₂ and CH₄ on presence and activity of the indigenous methanotrophic community in rice field soil. *Environmental Microbiology*, 2(6): 666-679 [DOI: 10.1046/j.1462-2920.2000.00149.x]
- Huang J Z. 1984. Geochemical characteristics of natural gases in the Sichuan Basin. *Geochimica*, (4): 307-321 (黄籍中. 1984. 四川盆地天然气地球化学特征. *地球化学*, (4): 307-321)
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press
- Jiang L, Cui Y J, Du J G, Ding Z H, Liu Y M and Liu Y N. 2021. Satellite hyperspectral remote sensing geochemical anomalies associated with three strong earthquakes around the Qinghai-Tibetan Plateau. *Earthquake*, 41(2): 129-144 (姜莉, 崔月菊, 杜建国, 丁志华, 刘永梅, 刘轶男. 2021. 青藏高原原缘三次强地震伴生的卫星高光谱遥感地球化学异常. *地震*, 41(2): 129-144) [DOI: 10.12196/j.issn.1000-3274.2021.02.010]
- Jiang W L and Zhang J F. 2011. Deep structures of Sichuan-Yunnan region derived from gravity data. *Progress in Geophysics*, 26(6): 1915-1924 (姜文亮, 张景发. 2011. 川滇地区重力场与深部结构特征. *地球物理学进展*, 26(6): 1915-1924) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2011.06.004]
- Jiang Z S, Fang Y, Wu Y Q, Wang M, Du F and Ping J J. 2009. The dynamic process of regional crustal movement and deformation before Wenchuan M_s 8.0 earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(2): 505-518 (江在森, 方颖, 武艳强, 王敏, 杜方, 平建军. 2009. 汶川8.0级地震前区域地壳运动与变形动态过程. *地球物理学报*, 52(2): 505-518)
- Jiao F Z, Yang Y, Ran Q, Wu G H and Liang H. 2021. Distribution and gas exploration of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 41(8): 92-101 (焦方正, 杨雨, 冉崎, 邬光辉, 梁瀚. 2021. 四川盆地中部地区走滑断层的分布与天然气勘探. *天然气工业*, 41(8): 92-101) [DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.009]
- Khalil M A K, Rasmussen R A, Wang M X and Ren L X. 1991. Methane emissions from rice fields in China. *Environmental Science and Technology*, 25(5): 979-981 [DOI: 10.1021/es00017a023]
- King C Y. 1986. Gas geochemistry applied to earthquake prediction: an overview. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B12): 12269-12281 [DOI: 10.1029/JB091iB12p12269]
- Li X Y, Cui Y J, Ma H Q and Wu K T. 2019. Anomalies on the changes of CH₄ and CO related to the 15 April 2015 Alashan Zuoqi M_s5.8 Earthquake in the Inner Mongolia. *Earthquake*, 39(4): 54-62 (李新艳, 崔月菊, 马禾青, 仵柯田. 2019. 2015年4月15日内蒙古阿拉善左旗M_s5.8地震前后CH₄和CO变化. *地震*, 39(4): 54-62)
- Liu J, Yi G X, Zhang Z W, Guan Z J, Ruan X, Long F and Du F Y. 2013. Introduction to the Lushan, Sichuan M7.0 earthquake on 20 April 2013. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(4): 1404-1407 (刘杰, 易桂喜, 张致伟, 官致君, 阮祥, 龙锋, 杜方. 2013. 2013年4月20日四川芦山M7.0级地震介绍. *地球物理学报*, 56(4): 1404-1407) [DOI: 10.6038/cjg20130434]
- Liu P X and Yi J. 2021. The field disaster investigation and earthquake damage analysis of the Luxian M6.0 Earthquake in Sichuan Province. *Overview of Disaster Prevention*, (5): 10-15 (刘培玄, 易佳. 2021. 四川泸县6.0级地震现场灾害调查与震害分析. *防灾博览*, (5): 10-15) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-6310.2021.05.003]
- Luca A D, Mignani R P, Marelli M, Salvetti D, Sartore N, Belfiore A, Parkinson P S, Caraveo P A and Bignami G F. 2013. PSR J0357+3205: a fast-moving pulsar with a very unusual X-ray trail. *The Astrophysical Journal Letters*, 765(1): L19 [DOI: 10.1088/2041-8205/765/1/L19]
- Martinelli G and Plescia P. 2005. Carbon dioxide and methane emissions from calcareous-marly rock under stress: experimental tests results. *Annals of Geophysics*, 48(1): 167-173 [DOI: 10.4401/ag-3191]
- McMillan W W, Barnett C, Strow L, Chahine M T, McCourt M L, Warner J X, Novelli P C, Korontzi S, Maddy E S and Datta S. 2005. Daily global maps of carbon monoxide from NASA's Atmospheric Infrared Sounder. *Geophysical Research Letters*, 32(11): L11801 [DOI: 10.1029/2004GL021821]
- Panda S K, Choudhury S, Saraf A K and Das J D. 2007. MODIS land surface temperature data detects thermal anomaly preceding 8 October 2005 Kashmir earthquake. *International Journal of Remote Sensing*, 28(20): 4587-4596 [DOI: 10.1080/01431160701244906]
- Pergola N, Aliano C, Coviello I, Filizzola C, Genzano N, Lacava T, Lisi M, Mazzeo G and Tramutoli V. 2010. Using RST approach and EOS-MODIS radiances for monitoring seismically active regions: a study on the 6 April 2009 Abruzzo earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(2): 239-249 [DOI: 10.5194/nhess-10-239-2010]
- Qiang Z J, Dian C G, Wang X J and Hu S Y. 1992. Satellite thermal infrared anomalous temperature increase and impending earthquake precursor. *Chinese Science Bulletin*, 37(19): 1642-1646 [DOI: 10.1360/sb1992-37-19-1642]
- Qiang Z J, Xu X D and Dian C G. 1991. Thermal infrared anomaly precursor of impending earthquakes. *Chinese Science Bulletin*, 36(4): 319-323 [DOI: 10.1360/sb1991-36-4-319]
- Saarnio S, Alm J, Martikainen P J and Silvola J. 1998. Effects of raised CO₂ on potential CH₄ production and oxidation in, and CH₄ emission from, a boreal mire. *Journal of Ecology*, 86(2): 261-268 [DOI: 10.1046/j.1365-2745.1998.00248.x]
- Saarnio S, Saarinen T I M O, Vasander H and Silvola J. 2000. A moderate increase in the annual CH₄ efflux by raised CO₂ or NH₄NO₃ supply in a boreal oligotrophic mire. *Global Change Biology*, 6(2): 137-144 [DOI: 10.1046/j.1365-2486.2000.00294.x]
- Saradjian M R and Akhoondzadeh M. 2011. Thermal anomalies detection before strong earthquakes (M>6.0) using interquartile, wavelet and Kalman filter methods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(4): 1099-1108 [DOI: 10.5194/nhess-11-1099-2011]

- Saraf A K and Choudhury S. 2005. Cover: NOAA-AVHRR detects thermal anomaly associated with the 26 January 2001 Bhuj earthquake, Gujarat, India. *International Journal of Remote Sensing*, 26(6): 1065-1073 [DOI: 10.1080/01431160310001642368]
- Schütz H, Seiler W and Conrad R. 1990. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields. *Biogeochemistry*, 11(2): 77-95 [DOI: 10.1007/bf00002060]
- Shao Y, Wang R F, Zhang Y Q, Wang X, Li Z H and Liang H. 2011. Strike-slip structures and oil-gas exploration in the NW margin of the Junggar Basin, China. *Acta Petrolei Sinica*, 32(6): 976-984 (邵雨, 汪仁富, 张越迁, 汪新, 李震华, 梁瀚. 2011. 准噶尔盆地西北缘走滑构造与油气勘探. *石油学报*, 32(6): 976-984) [DOI: 10.7623/syxb201106007]
- Sheng Q and Xie X S. 2010. New discovery of late-quaternary right-lateral and reverse displacement in Huayingshan fault zone in Gao County, Sichuan Province. *Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics*. Beijing: The Institute of Crustal Dynamics, CEA: 1-10 (盛强, 谢新生. 2010. 四川华蓥山断裂带晚第四纪逆走滑特征及地震意义. *地壳构造与地壳应力文集*. 北京: 中国地震局地壳应力研究所: 1-10)
- Sun Y T, Cui Y J, Liu Y M, Du J G, Zhang W B and Zhang G Y. 2014. Anomalies remote sensing geochemistry of CO and O₃ and ground-based validation before and after two Sumatra $M > 8.0$ earthquakes. *Journal of Seismological Research*, 37(2): 222-227 (孙玉涛, 崔月菊, 刘永梅, 杜建国, 张炜斌, 张冠亚. 2014. 苏门答腊两次 $M > 8.0$ 地震前后 CO 和 O₃ 卫星遥感气体地球化学异常与地面验证. *地震研究*, 37(2): 222-227) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0666.2014.02.009]
- Susskind J, Barnett C D and Blaisdell J M. 2003. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 390-409 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.808236]
- Toutain J P and Baubron J C. 1999. Gas geochemistry and seismotectonics: a review. *Tectonophysics*, 304(1/2): 1-27 [DOI: 10.1016/S0040-1951(98)00295-9]
- Tramutoli V, Aliano C, Corrado R, Filizzola C, Genzano N, Lisi M, Martinelli G and Pergola N. 2013. On the possible origin of thermal infrared radiation (TIR) anomalies in earthquake-prone areas observed using robust satellite techniques (RST). *Chemical Geology*, 339: 157-168 [DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.10.042]
- Tronin A A. 2006. Remote sensing and earthquakes: a review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(4/9): 138-142 [DOI: 10.1016/j.pce.2006.02.024]
- Wang C M and Li X H. 1991. Applications of fracture-gas measurement to the earthquake studies in China. *Earthquake Research in China*, (2): 21-32 (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*, (2): 21-32)
- Wang J, Li X R, He C C and Zeng Z X. 2015. Methane concentration responses associated with the seismic activity in atmospheric troposphere. *Earth Science*, 24(10): 1677-1688 (王杰, 李献瑞, 贺赤诚, 曾佐勋. 2015. 对流层大气甲烷浓度对地震活动的响应. *地球科学*, 24(10): 1677-1688) [DOI: 10.3799/dqkx.2015.151]
- Wang J, Zhang X, Pan L L and Zeng Z X. 2013. Anomalies of temperature increase and methane release before Lushan earthquake (Ms7.0). *Earth Science Frontiers*, 20(6): 29-35 (王杰, 张雄, 潘黎黎, 曾佐勋. 2013. 芦山地震($M_s 7.0$)前甲烷释放与大气增温异常. *地学前缘*, 20(6): 29-35)
- Wang Y L, Chen G H, Kang C L and Zhang Q. 2008. Earthquake-related thermal-infrared abnormality detection with wavelet packet decomposition. *Progress in Geophysics*, 23(2): 368-374 (王亚丽, 陈桂华, 康春丽, 张倩. 2008. 利用小波包分析进行地震相关热红外辐射异常信息检测. *地球物理学进展*, 23(2): 368-374)
- Wang Z, Wang J, Chen Z L, Liu Y P, Huang R Q, Pei S P, Zhang Q Z and Tang W Q. 2011. Seismic imaging, crustal stress and GPS data analyses: implications for the generation of the 2008 Wenchuan Earthquake (M7.9), China. *Gondwana Research*, 19(1): 202-212 [DOI: 10.1016/j.gr.2010.05.004]
- Wang Z J, Wang H C, Dong D and Qin J. 2018. Review of geophysical results of Huayingshan fault zone. *Earthquake Research in Sichuan*, (3): 6-12 (王赞军, 王宏超, 董娣, 秦娟. 2018. 华蓥山断裂带的物探成果综述. *四川地震*, (3): 6-12) [DOI: 10.13716/j.cnki.1001-8115.2018.03.002]
- Wen L, Wang H, Xu L, Zhang Y, Yuan H F, Chen S L, Qiao Y P and Shen C. 2021. Characteristics and main controlling factors of gas accumulation of the Middle Permian Qixia Formation in western Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 26(6): 68-81 (文龙, 汪华, 徐亮, 张亚, 袁海锋, 陈双玲, 乔艳萍, 谌辰. 2021. 四川盆地西部中二叠统栖霞组天然气成藏特征及主控因素. *中国石油勘探*, 26(6): 68-81) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.06.005]
- Wu J, Kong S F, Wu F Q, Cheng Y, Zheng S R, Qin S, Liu X, Yan Q, Zheng H, Zheng M M, Yan Y Y, Liu D T, Ding S, Zhao D L, Shen G F, Zhao T L and Qi S H. 2020. The moving of high emission for biomass burning in China: view from multi-year emission estimation and human-driven forces. *Environment International*, 142: 105812 [DOI: 10.1016/j.envint.2020.105812]
- Wu Y Q, Jiang Z S, Zhao J, Liu X X, Wei W X, Liu Q, Li Q, Zou Z Y and Zhang L. 2015. Crustal deformation before the 2008 Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake studied using GPS data. *Journal of Geodynamics*, 85: 11-23 [DOI: 10.1016/j.jog.2014.12.002]
- Xiong X, Barnett C, Wei J and Maddy E. 2009a. Information-based mid-upper tropospheric methane derived from Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) and its validation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9: 16331-16360 [DOI: 10.5194/acpd-9-16331-2009]
- Xiong X, Houweling S, Wei J, Maddy E, Sun F and Barnett C. 2009b. Methane plume over south Asia during the monsoon season: satellite observation and model simulation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(3): 783-794 [DOI: 10.5194/acp-9-783-2009]
- Xiong X Z, Barnett C, Maddy E, Sweeney C, Liu X P, Zhou L H and Goldberg M. 2008. Characterization and validation of methane products from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). *Journal of Geophysical Research*, 113: G00A01 [DOI: 10.1029/2007JG000500.]
- Xiong X Z, Barnett C, Maddy E, Wei J, Liu X P and Pagano T S. 2010a. Seven years' observation of mid-upper tropospheric meth-

- ane from atmospheric infrared sounder. *Remote Sensing*, 2(11): 2509-2530 [DOI: 10.3390/rs2112509]
- Xiong X Z, Barnet C D, Zhuang Q L, Machida T, Sweeney C and Patra P K. 2010b. Mid-upper tropospheric methane in the high Northern Hemisphere: spaceborne observations by AIRS, aircraft measurements, and model simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D19): D19309 [DOI: 10.1029/2009JD013796]
- Xu X D, Xu X M and Wang Y. 2000. Satellite infrared anomaly before Nantou $M_s=7.6$ Earthquake in Taiwan, China. *Acta Seismologica Sinica*, 22(6): 666-669 (徐秀登, 徐向民, 王煜. 2000. 台湾南投 7.6 级地震前卫星红外异常. *地震学报*, 22(6): 666-669)
- Yagi K and Minami K. 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition*, 36(4): 599-610 [DOI: 10.1080/00380768.1990.10416797]
- Ye M Q, Wu Q Y and Yang Z D. 1995. Example of research on relation between satellite thermal infrared anomaly and strong earthquake. *Chinese Science Bulletin*, 40(7): 576-580 [DOI: 10.1360/sb1995-40-7-576]
- Yi G X, Zhao M, Long F, Liang M J, Wang M M, Zhou R J and Wang S W. 2021. Characteristics of the seismic sequence and seismogenic environment of the $M_s6.0$ Sichuan Luxian earthquake on September 16, 2021. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(12): 4449-4461 (易桂喜, 赵敏, 龙锋, 梁明剑, 王明明, 周荣军, 王思维. 2021. 2021 年 9 月 16 日四川泸县 $M_s6.0$ 地震序列特征及孕震构造环境. *地球物理学报*, 64(12): 4449-4461) [DOI: 10.6038/cjg202100533]
- Yue Z Q. 2013. Cause and mechanism of highly compressed and dense methane gas mass for Wenchuan earthquake and associated rock-avalanches and surface co-seismic ruptures. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 15-20 (岳中琦. 2013. 汶川地震与山崩地裂的极高压甲烷天然气成因和机理. *地学前缘*, 20(6): 15-20)
- Zhang D Y and Liao H. 2015. Advances in the research on sources and sinks of CH_4 and observations and simulations of CH_4 concentrations. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 5(1): 40-47 (张定媛, 廖宏. 2015. 大气甲烷的源和汇及其浓度的观测模拟研究进展. *气象科技进展*, 5(1): 40-47) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.01.005]
- Zhang J H, Li Y X, Guo L Q and Zhang Z F. 2005. Contemporary tectonic movement and internal deformation of South China block. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 25(3): 57-62 (张静华, 李延兴, 郭良迁, 张中伏. 2005. 华南块体的现今构造运动与内部形变. *大地测量与地球动力学*, 25(3): 57-62) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2005.03.011]
- Zhang X, Zhang Y S, Wei C X, Tian X F and Feng H W. 2013a. Thermal infrared anomaly prior to Yiliang of Yunnan $M_s5.7$ earthquake. *China Earthquake Engineering Journal*, 35(1): 171-176 (张璇, 张元生, 魏从信, 田秀丰, 冯红武. 2013a. 云南彝良 5.7 级地震前卫星热红外异常. *地震工程学报*, 35(1): 171-176) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0171]
- Zhang X, Zhang Y S, Wei C X, Tian X F, Tang Q and Gao J. 2013b. Analysis of Thermal Infrared Anomaly before the Lushan $M_s7.0$ Earthquake. *China Earthquake Engineering Journal*, 35(2): 272-277 (张璇, 张元生, 魏从信, 田秀丰, 汤倩, 高见. 2013b. 四川芦山 7.0 级地震卫星热红外异常解析. *地震工程学报*, 35(2): 272-277) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0272]
- Zhang Y S, Guo X, Zhong M J, Shen W R, Li W and He B. 2010. Wenchuan earthquake: brightness temperature changes from satellite infrared information. *Chinese Science Bulletin*, 55(18): 1917-1924 (张元生, 郭晓, 钟美娇, 沈文荣, 李稳, 何斌. 2010. 汶川地震卫星热红外亮温变化. *科学通报*, 55(10): 904-910) [DOI: 10.1360/csb2010-55-10-904]
- Zhao C J. 1984. On the characteristics, types and mechanism of vertical structural variations in Sichuan Basin. *Acta Petroli Sinica*, 5(2): 11-21 (赵从俊. 1984. 四川盆地构造垂向变异特征类型及其机理探讨. *石油学报*, 5(2): 11-21) [DOI: 10.7623/syxb198402003]
- Zhao W Z, Xie Z Y, Wang X M, Shen A J, Wei G Q, Wang Z C and Wang K. 2021. Sinian gas sources and effectiveness of primary gas-bearing system in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1089-1099 (赵文智, 谢增业, 王晓梅, 沈安江, 魏国齐, 汪泽成, 王坤. 2021. 四川盆地震旦系气源特征与原生含气系统有效性. *石油勘探与开发*, 48(6): 1089-1099) [DOI: 10.11698/PED.2021.06.02]

Feasibility exploration of methane seismic monitoring in local areas of Sichuan and Yunnan: Taking the $M6.0$ earthquake in Luxian, Sichuan in september 2021 as an example

WANG Xu^{1,2,3}, CUI Jing^{1,2,3}, WANG Lin^{1,2,3}, LI Chenxi¹, WANG Zhonghao¹, SHEN Xuhui^{2,3}, JIANG Wenliang^{2,3}, ZHANG Jingfa^{2,3}

1. Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, China;

2. National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China;

3. Key Laboratory of Emergency Satellite Engineering and Application, Ministry of Emergency Management, Beijing 100124, China

Abstract: Studies showed that earthquakes can cause anomalies of methane gas in the atmosphere. The present study selected a certain area

in Sichuan-Yunnan Province, and the Luxian earthquake in Sichuan Province in September 2021 was taken as an example. Based on methane gas products obtained by the Atmospheric Infrared Sounder, a hyperspectral sensor was carried by the US Earth observation satellite AQUA/Earth Observation System(AQUA/EOS). The mature Robust Satellite Technique(RST) algorithm was used to extract methane anomaly information before and after the earthquake. The background field characteristics of methane in the study area were analyzed. Moreover, the methane anomaly index time series analysis was performed for earthquakes with a magnitude of 6 or above in the region since 2008. Results showed that the methane background field in the study area is related to topography and geomorphology and has obvious spatial and temporal distribution characteristics. In particular, the difference in biodiversity and temperature is caused by seasonal changes in time, and the methane concentration regularly changes. The spatial variation is mainly related to topography and geomorphology. The seismic-related characteristic is high methane concentration at the fault and plate tectonic junction. The methane anomaly has a certain correspondence with the earthquake. This finding mainly shows that the distribution law of the temporal and spatial characteristics of methane in the regional history is broken. Moreover, the overall changes in the earthquake preparation process show certain characteristics: initial intensification, abnormal intensification, peak attenuation, and calm. The magnitude of the anomaly has no obvious relationship with the earthquake's magnitude. However, the duration of the anomaly may be related to the magnitude of the earthquake; that is, the methane anomaly caused by the earthquake is not accidental and has a certain duration of the anomaly. In particular, the amplitude of the anomaly is greater than 2, the duration of the anomaly is at least 1 month, the amplitude of the anomaly is greater than 1, and the duration is more than 3 months. The anomaly may correspond to earthquakes in a certain region. Further research should be conducted through the comprehensive analysis of the structural and geological conditions, earthquake magnitude, and comparison of different research area radii in the following years. Conducting seismic anomaly monitoring of methane gas is feasible based on remote sensing in the local Sichuan-Yunnan region. This finding is related to the fact that the region itself is rich in hydrocarbon gas. The occurrence of earthquakes prompts the rapid migration and diffusion of underground massive hydrocarbon gas into the atmosphere along the weak zone, such as rock fissures, fault zones, and unconformity surfaces. This study preliminarily shows that the study of seismic methane anomaly in this local area is suitable for earthquakes with a similar tectonic background within the scope. Given the limitations of the study area, the follow-up study will fully consider the differences in tectonic backgrounds, combined with the distribution of oil and gas reservoirs, to conduct in-depth research outside the local area and further explore the feasibility of seismic methane anomaly monitoring.

Key words: remote sensing, Luxian earthquake, methane, abnormal response, abnormal monitoring

Supported by Major Project for High Resolution Earth Observation (No.31-Y30F09-9001-20/22-02); National Key Research and Development Program (No. 2021YFB3901203); The Second Phase of the Asia-Pacific Earthquake Project