

彭莱,樊春燕,汪倩,等. 2024. 中国地震断裂带 CO₂ 观测研究现状. 中国地震, 40(4): 733~751.

中国地震断裂带 CO₂ 观测研究现状

彭莱^{1,2)} 樊春燕³⁾ 汪倩²⁾ 蒋雨函²⁾ 周启超^{1,2)} 高小其^{1,2)}

1) 中国科学院大学, 应急管理科学与工程学院, 北京 100049

2) 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 地壳动力学重点实验室, 北京 100085

3) 中国地震台网中心, 北京 100045

摘要 CO₂ 气体可以反映地球深部活动信息, 且被广泛应用于深部断层活动以及构造运动的研究。本文初步探讨了地下深源 CO₂ 的化学特性以及有机成因、变质成因和幔源成因三大形成机理, 探求其来源判定方法。同时, 基于气相色谱仪、CO₂ 快速测定管和数字化 CO₂ 仪三种监测分析方法, 分析了断裂带 CO₂ 观测研究的进展, 简述了数据处理和异常识别方法。并通过具体震例, 获得了断裂带 CO₂ 气体在地震前几个月至几天内出现的高出背景值数倍甚至数十倍的显著异常特征。最后, 讨论了常见因素对断裂带逸出 CO₂ 的影响: CO₂ 浓度主要受地下应力影响, 与地下应力强度、气温呈正相关, 与气压、降水呈负相关。

关键词: 地震断裂带 二氧化碳气体 断层土壤气

[文章编号] 1001-4683(2024)04-0733-19 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地下流体与地壳固体之间存在着动态平衡, 可以灵敏地将地球深部的断层及构造活动信息传递到浅部。自 1931 年希腊的马拉松人工湖蓄水诱发地震后, 地下流体与地震间的联系逐渐被人们重视(荣建东, 1982), 断层带地下水中气体也在 1966 年塔什干 5.2 级地震发生后被用于地震预测研究工作(Sadovsky et al, 1972)。Irwin 等(1980)认为地下 CO₂ 有地幔、含碳酸盐沉积岩的变质作用以及有机物质分解三个主要来源, 他们还发现深层 CO₂ 变化量可以作为监测预测地震的有用参数。Sugisaki 等(1983)发现日本中部断层沿线的高浓度 H₂ 和 CO₂ 气体出现明显时空变化, 其研究进一步验证地下 CO₂ 可用于断层活动性评估和地震预测。

中国于 20 世纪 70 年代开始对井和泉水中的 CO₂ 进行观测和研究。1976 年唐山 7.8 级地震前, 天津市多井观测到溶解气 CO₂ 含量出现波动较大的同步升降; 北京万泉庄枯井也观测到突然喷气, 其中 CO₂ 含量高达 13.4% (石慧馨等, 1980; 鱼金子等, 1998)。在 1987—1991 年间, 研究人员在数起地震前均观测到 CO₂ 含量显著异常, 且这些异常多起始

[收稿日期] 2023-11-22 [修定日期] 2024-03-01

[项目类别] 国家重点研发计划(2019YFC1509203)、中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2021-11)共同资助

[作者简介] 彭莱, 男, 1999 年生, 硕士, 主要从事地下流体和地球化学研究工作。E-mail: thepl@foxmail.com

高小其, 通讯作者, 男, 1966 年生, 研究员, 主要从事地震地下流体和地球化学研究工作。

E-mail: gaqx06@126.com

于地震前半个月左右,在临震时达到高峰,在震后减弱或消失(上官志冠等,1990、1992、1993;高清武等,1992;孔令昌,1996)。林元武等(1998a)在1988年成功实验研究了CO₂快速测定法,并在河北怀来断裂带观测到9个4级以上地震的CO₂异常震例,后续高小其等(2002、2004)的研究也证实了该方法可靠有效。王基华等(2000)在1997年利用怀来断层气CO₂监测做出地震短临预测,成为全球首次成功案例。大量的观测研究已表明,断裂带CO₂的前兆异常能够被视为地震活动的重要指示器之一,且随着更多先进仪器的发明改进(杨伊娜等,2022)和多方综合观测手段(张志相等,2022)的创新发展,我国断裂带CO₂观测研究工作进入便捷化、精准化、连续化的新时代。

本文旨在基于国内外学者对深源CO₂地球化学特性、观测方法和影响因素、数据处理和异常识别、浓度异常机理与地震关系等方面的研究成果,对断裂带CO₂研究进展进行总结,探讨如何利用地震断裂带中CO₂前兆异常进行地震预报,为相关研究提供重要的思路和理论基础。

1 CO₂ 地球化学特征

1.1 CO₂ 化学特征

CO₂普遍存在于地球上,是一种无色、无嗅、略带酸味的气体,密度大于空气,具有相对稳定的化学性质。CO₂在地球上的来源相当复杂,导致在地球上其分布和含量并不均匀,不同深度部位之间存在较大差异。此外,同一地点的CO₂含量也会随时间的变化而存在较大差异(车用太等,2006)。

地下气体的释放主要发生在活动断裂带和火山活跃区,其中的主要成分为CO₂。一些强震发生前,地下构造活动通常会大幅增强,从而导致地下气体的释放出现明显异常变化。在火山喷发所排放的气体中,除了水蒸气外,CO₂的含量通常会位居首位,且火山岩浆岩在加热脱气的过程中也会释放出大量CO₂(Gurrieri et al,2021)。此外,新洋壳形成的水热流体也会释放出包括大量CO₂在内的混合气体(刘耀炜等,2015;张翔等,2019)。

地下流体中许多组分的变化均与CO₂释放有关。在流体迁移过程中,其中具有化学活性的CO₂还会参与不同环境条件下的各类反应。因此,在地球的各种动力学过程中,CO₂有着不可忽视的作用,对一些常见地下气体组分的生成与迁移会产生重要的影响(上官志冠等,1990;Fu et al,2005)。

1.2 CO₂ 来源判定

断裂带CO₂来源可分为有机成因与无机成因两大类,其中无机成因又可以细分为变质成因和幔源成因。现代地震活动导致地震断裂带释放出大量CO₂,研究人员对其中的稳定碳、氧同位素进行分析,发现这些CO₂主要源于地壳深部的变质成因和幔源成因(上官志冠等,1993)。

$\delta^{13}\text{C}$ 是一种鉴别有机成因和无机成因CO₂的有效指标。当前较为公认的划分标准是:有机成因CO₂的 $\delta^{13}\text{C} < -10\text{‰}$,主要分布在 $-10\text{‰} \sim -30\text{‰}$;无机成因中,变质成因CO₂的 $\delta^{13}\text{C}$ 在 $0 \pm 3\text{‰}$ 之间;幔源成因CO₂的 $\delta^{13}\text{C}$ 大多在 $-6\text{‰} \pm 2\text{‰}$ (表1)(戴金星,1995;王云等,2015;左银辉等,2021)。

表 1 不同来源 CO₂ 的 δ¹³C 值 (据左银辉等 (2021))

CO ₂ 来源	有机成因	变质成因	幔源成因
δ ¹³ C (‰, PDB)	-10 ~ -30	0 ± 3	-6 ± 2

1.2.1 有机成因

有机成因是有机质在热演化过程中经过不同地球化学作用形成 CO₂。研究人员针对此类 CO₂ 成因类型的划开展了一系列研究,将其形成途径归纳为以下 5 种:有机质被氧化、有机质热降解、有机质微生物降解、有机质裂解以及生物呼吸作用(左银辉等,2021;刘峰立等,2023)。

Sciarra 等 (2017) 的研究表明,意大利梅多拉 (Medolla) 地区土壤逸出气 CO₂ 主要源于富含有机物的表层和更深层的产热源,2012 年艾米利亚—罗马涅 (Emilia—Romagna) 地震序列前后 CO₂ 异常增加主要是因为构造运动导致浅层有机成因 CO₂ 得到迁移释放。此外,Zhou 等 (2016) 也发现汶川地震破裂带 CO₂ 浓度的异常增加主要源于有机成因。根据已有研究表明,我国有机成因生成 CO₂ 的 δ¹³C 在 -8 ~ -39‰ 之间,其中大部分位于 -12‰ ~ -17‰ 区间内(戴金星,1993)。

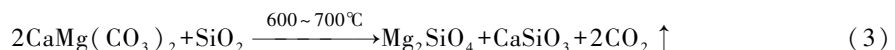
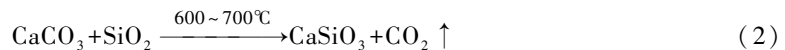
1.2.2 变质成因

变质成因的 CO₂ 主要以产生时的动力源分为两类:一是接触变质作用,二是断裂变质作用。该成因产生 CO₂ 主要发生的化学反应有:

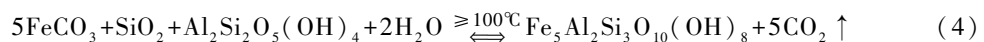
在 400℃ 高温的作用下,碳酸盐岩石产生分解生成 CO₂, 反应方程式如下



在 600 ~ 700℃ 高温作用下,含硅质的碳酸盐沉积岩发生变质,生成硅灰石或者镁橄榄石,反应的过程中伴随产生 CO₂ 气体,反应方程式如下



在超过 100℃ 温度作用下,硅酸盐与碳酸盐岩矿物发生水解,伴随反应会产生大量 CO₂ (Hutcheon et al, 1990), 反应方程式如下



Troll 等 (2012) 发现 2006 年 Yogyakarta 6.4 级期间地壳应力变化加速了钙硅酸盐的变质分解,导致土壤逸出气 CO₂ 异常增多。Chen 等 (2019) 研究发现,唐山断裂带区域土壤逸出气 CO₂ 主要源于有机成因和变质成因,在 2018 年唐山 3.7 级地震序列前出现的 CO₂ 浓度异常是由于石灰岩变质生成的 CO₂ 含量增加。

1.2.3 幔源成因

在地幔来源的熔岩喷出气、大洋中脊喷出气以及温泉逸出气中,CO₂ 一直是主要成分。全球范围内的研究表明,CO₂ 在火山喷出气体总量中的占比超过 50%,甚至可高达 98%。此外,岩浆被认为是地下 CO₂ 气体的重要来源,地幔流体中 CO₂ 含量约占总气体量的 50% 以上(鱼金子等,1998)。

Zhang 等(2015)对长白山火山附近温泉和土壤逸出气研究,发现其中 CO_2 主要源于板块衍生熔体,即幔源成因,后续 Wei 等(2016)的研究也印证了这一观点。

1.2.4 其他判定方法

如果在地下气体 CO_2 的研究中仅依靠碳同位素或者含量组分对其来源进行判定,可能会受到同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值交叉重叠等因素影响。因此,在原有单一测定 $\delta^{13}\text{C}$ 方法上,研究人员还会基于稀有气体比值、复合气体含量比值和多个指标共同约束等多种判识方法进一步提高 CO_2 来源的判断精度(杜建国等,2003;王云等,2015;左银辉等,2021)。

2 观测方法

已有研究表明,地震断裂带土壤中 CO_2 释放通量的变化与地震活动之间存在着良好的响应关系(李营等,2022)。然而, CO_2 气体的浓度测量值在时间和空间上差异较大。例如,在土壤气观测中, CO_2 的背景浓度通常在 1%~5% 之间,而在一些热泉井和泥火山观测点, CO_2 的背景浓度甚至高于 30%。因此,断裂带 CO_2 连续观测仪器必须具备高灵敏度、高稳定性和宽量程,以确保能够覆盖背景浓度和异常浓度的测量范围。

在我国断裂带 CO_2 观测工作中,大部分学者研究都基于地面上定点连续观测和流动观测(刘春国等,2022),观测方法可以根据所使用的气相色谱仪、 CO_2 测定管和数字化 CO_2 仪分为三类。

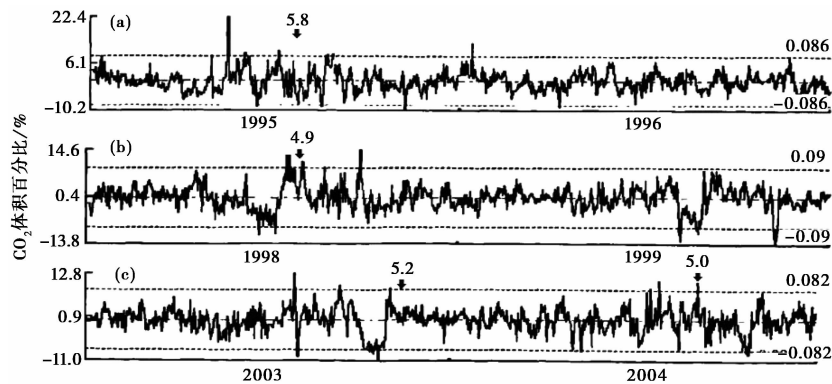
2.1 气相色谱仪观测法

我国早期的 CO_2 观测工作通常是在观测点现场采集样品后送至实验室的气相色谱仪进行处理分析。随着技术的发展,便携式和在线式气相色谱仪逐渐推广,这些仪器具有更为便捷的操作优势和更准确的监测能力。气相色谱仪的工作原理是:由于混合气体中各组分的性质和结构不同,导致其在固定相和流动相的分配系统中具有不同的行为和停留时间,从而可以通过分离或顺序检测来确定各组分的含量。

2008年5月12日,四川汶川发生8.0级地震。固原硝口水化观测点的 CO_2 气体观测值在1至3月出现缓慢波动,在4月底至5月初时多次出现了超过2.5倍均方差的异常高值。该监测点还在1990—2006年间6次地震前观测到缓降后转折上升且出现多次单点突升的 CO_2 前兆异常(表2,图1)(司学芸等,2011)。

表2 固原硝口 CO_2 前兆异常及映震情况(据司学芸等(2011))

地震日期	地点	震级	震中距/km	异常提前量/d	持续时间/d
1990-10-20	甘肃景泰	6.2	260	22	165
1995-07-22	甘肃永登	5.8	300	83	16
1998-07-29	宁夏海原	4.9	100	91	151
2003-11-13	甘肃岷县	5.2	250	108	98
2004-09-07	甘肃岷县	5.0	250	50	47
2006-06-21	甘肃文县	5.1	350	48	53
2008-05-12	四川汶川	8.0	600	142	152



注：(a) 1995—1996 年数据；(b) 1998—1999 年数据；(c) 2003—2004 年数据。

图 1 固原硝口监测点 CO₂ 日测值与傅立叶分析周期值之差变化曲线(据司学芸等(2011))

刘雷等(2012)在 2010 年玉树地震后观测到：在 5 月和 6 月断层土壤气 CO₂ 浓度持续增加过程中,发生了包括 1 次 4.8 级和 2 次 5.7 级地震在内的多次余震；在 7 月 13 日玉树 4.9 级余震发生前,CO₂ 浓度出现明显的波动变化(图 2)。Fu 等(2017)在中国台湾北部关西竹东地区发现,地震发生前的几个小时到几天内土壤逸出的氦和钷浓度会出现大幅度异常,而作为载气的 CO₂ 也与这两种气体呈现正相关变化。

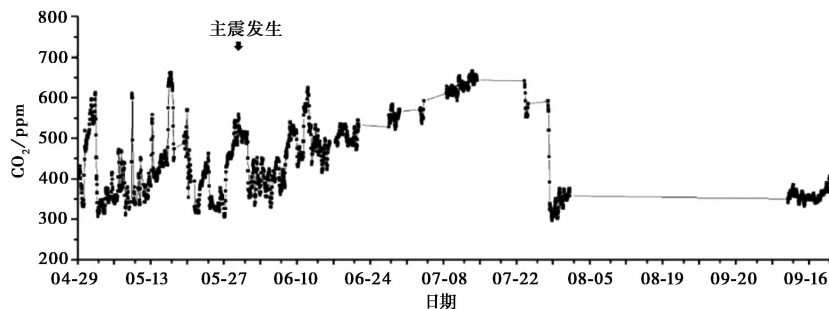
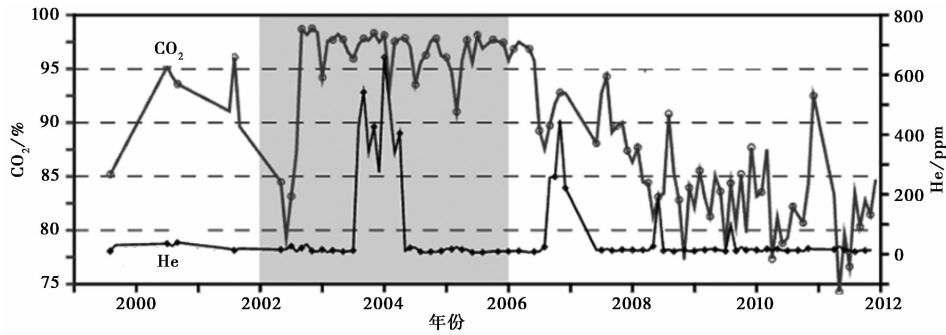


图 2 玉树地震期间地震断层土壤气 CO₂ 浓度变化图(据刘雷等(2012))

Xu 等(2012)发现长白山火山周围 3 个温泉的 CO₂ 含量在 2002—2006 年的地震火山活跃期出现显著提升(图 3)。研究人员在云南香格里拉下给、天生桥温泉和四川康定龙头沟温泉的研究中也发现,断裂带区域温泉水化学和逸出气中 CO₂ 浓度会在地震前出现明显异常现象(李志鹏等,2012; 李其林等,2019)。

2.2 CO₂ 快速测定法

1988 年起,CO₂ 快速测定法在国内经实验证明后,由于其低成本、操作简单等一系列优点,被广泛投入使用(林元武等,1998a)。CO₂ 快速测定法是基于化学反应的监测法,使用的测定管内部填充吸附了百里酚酞的活性氧化铝,其工作原理是:CO₂ 进入管内改变内部酸碱环境,使得百里酚酞由蓝色本色变为无色,继而将活性氧化铝的白色本色显露出来,因此可以根据测定管白色柱体长度直接推算出单位时间内进入管中的 CO₂ 量。



注：阴影区域表示“地震及火山活跃期”。

图3 1999—2012年温泉CO₂和He浓度的月变化示意图(据Xu等(2012))

CO₂快速测定法与其他两种方法的测定原理不同,测出的CO₂数据含义也不同。CO₂快速测定法是一种绝对测量法,其含义是从测定管放置到回收时间段内(一般为24h)测定孔中释放出的CO₂总量,单位为mg/d。

林元武等(1998a、1998b)观测记录了1991—1998年期间9个4级以上地震的怀来断层气CO₂前兆异常震例(表3)。这些CO₂异常出现在震前15~47天,异常峰值是背景值的1.3~10倍,大多数地震发生在异常达到峰值后的下降过程中(图4)。

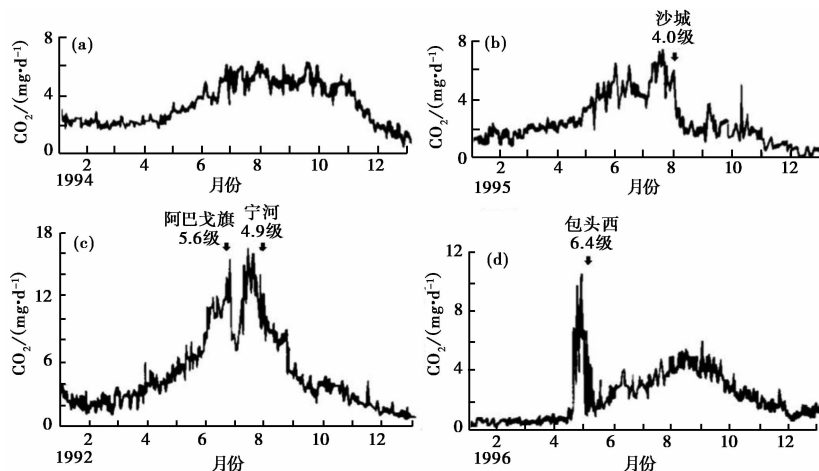
表3 怀来断层气CO₂前兆异常及映震情况(据林元武等(1998b))

地震日期	地点	震级	震中距/km	异常提前量/d	异常幅度/倍
1991-09-30	苏尼特右旗	5.8	340	32	3.2
1991-10-05	宁河东	4.6	230	37	3.2
1991-10-12	大同县东	4.3	150	18	2.9
1992-06-13	阿巴戈旗	5.6	390	18	2.6
1992-07-22	宁河	4.9	240	19	3.0
1993-08-30	浑源东北	4.5(群震)	150	39	2.5
1995-07-20	沙城	4.0	20	15	1.3
1996-05-03	包头西	6.4	500	16	10.0
1998-01-10	张北	6.2	120	47	10.0

官致君等(2002、2003)发现北川断层气CO₂在1999年绵竹2次5.0级地震前均出现跳跃上升型异常,测值高出正常年均背景值约为39%。在2001年四川雅江5.0级和6.0级地震前,观测到距震中190km处的冕宁断层气CO₂出现跳跃波动上升型异常,异常峰值接近背景值2倍大小。此外,2001年云南永胜6.0级地震前2个月,观测到距震中250km处的冕宁断层气CO₂日测值出现异常,高出背景值约46%(图5)。

1999年11月—2004年12月期间,长乐筹东CO₂监测点于7次地震前测得CO₂前兆异常特征(表4)。这些异常出现在震前10~44天不等,表现为跳跃式或振荡式上升,变化幅度异常达到同期正常背景值的2~3倍(图6)(林依再,2006)。

张立等(2007)分析了2005—2006年间滇东北地区地震前会东和普格监测点发现的断



注：(a) 怀来断层气 CO₂ 正常年内动态变化图；(b) 1995 年沙城 4.0 级地震；(c) 1992 年阿巴戈旗 5.6 级和宁河 4.9 级地震；(d) 1996 年包头西 6.4 级地震。

图 4 1992—1996 年间地震前后怀来断层气 CO₂ 变化曲线(据林元武等(1998b))

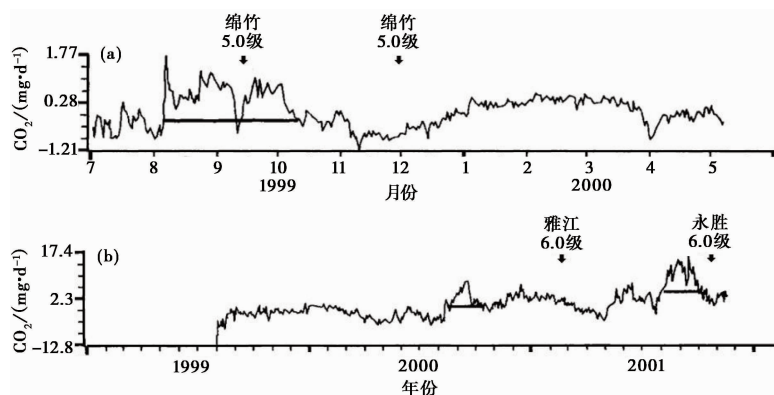


图 5 1999—2001 年间地震前后北川(a)和冕宁(b)断层气 CO₂ 变化曲线(据官致君等(2003))

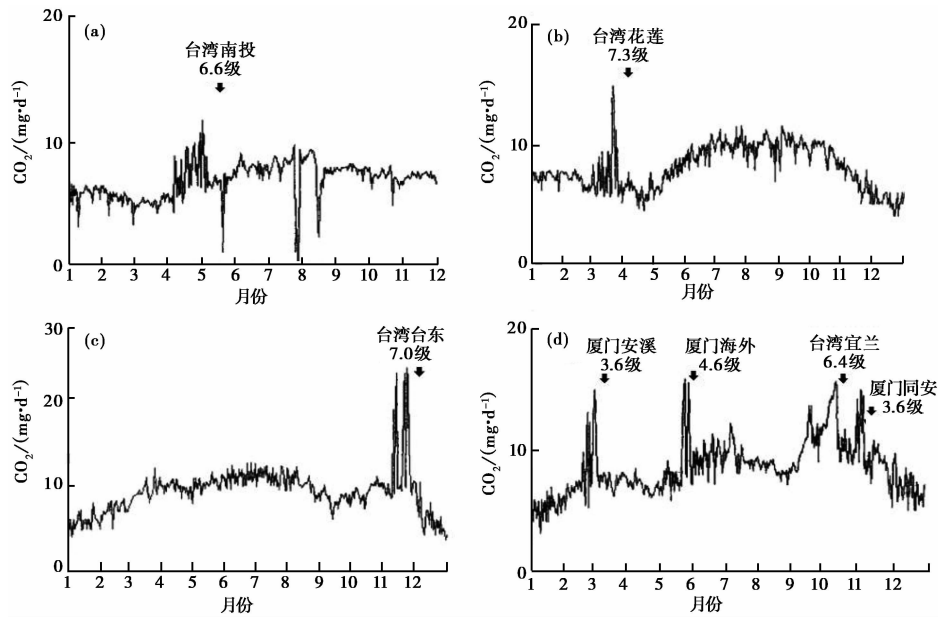
表 4 长乐筹东 CO₂ 前兆异常及映震情况(据林依再(2006))

地震日期	地点	震级	震中距/km	异常提前量/d	异常持续时间/d
2000-06-11	南投	6.6	280	44	29
2002-03-31	花莲海外	7.3	340	29	24
2003-12-10	台东	7.0	390	30	14
2004-03-04	安溪	3.6	180	12	9
2004-05-30	厦门海外	4.6	240	10	6
2004-10-15	宜兰	6.4	300	31	26
2004-11-10	同安	3.7	210	13	7

层气 CO₂ 异常(图 7)。观测发现：临近地震发生的短期阶段,流体前兆异常数量有明显增多的趋势；在 2006 年地震频发期间,CO₂ 异常幅度更大。

2.3 数字化 CO₂ 仪检测法

目前用于断层气监测工作的数字化 CO₂ 仪主要分为 3 种,分别是：基于传统红外技术



注：(a)2000年中国台湾南投6.6级地震；(b)2002年中国台湾花莲7.5级地震；(c)2003年中国台湾台东7.0级地震；(d)2004年厦门安溪3.6级、厦门海外4.6级、中国台湾宜兰6.4级和厦门同安3.7级地震。

图6 2000—2004年间地震前后长乐筹东CO₂测值变化曲线(林依再(2006))

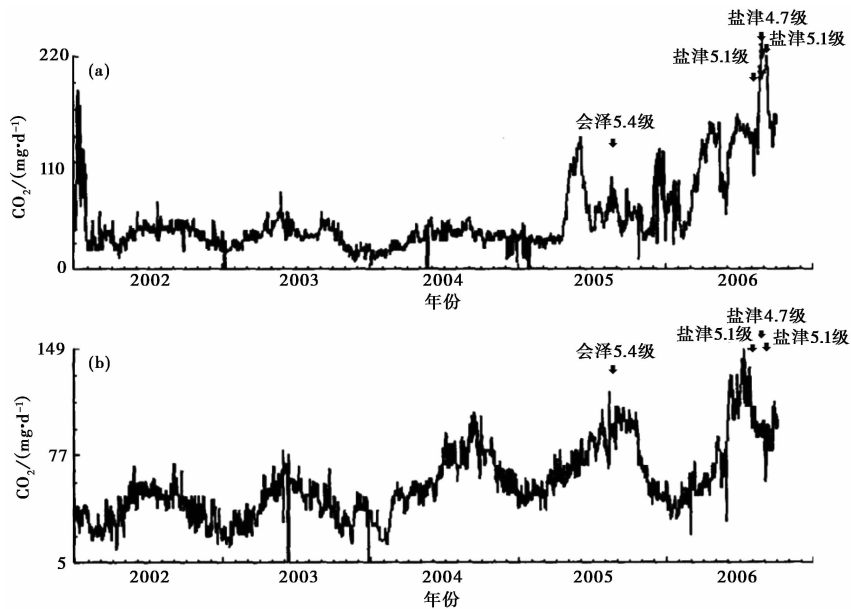


图7 2005—2006年滇东北地区四川会东(a)和四川普格(b)地震前监测点CO₂异常变化曲线(据张立等(2007))

(IR)、基于非色散红外技术(NDIR)和基于可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)的数字监测仪。这三类仪器都是利用了 Beer-Lambert 定律,通过测量被观测气体吸收前后的光强变化,计算出被测气体的浓度(杨伊娜等,2022;陈家金,2018),其公式如下

$$I = I_0 \exp(-\alpha CL) \tag{5}$$

式中, I 为出射光强, I_0 为入射光强, α 为气体吸收系数, C 为气体浓度, L 为吸收路径长度。式(5)通过变换得到

$$C = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) (\alpha L)^{-1} \tag{6}$$

红外光或者单一频率激光的 L 、 α 已知, 通过监测入射光强 I_0 与出射光强 I 的比值, 即可通过公式推出气体的浓度 C 。

IR 和 NDIR 数字化监测仪均使用红外光作为光源, 区别是 NDIR 传感器使用滤光器来选择特定的红外光谱范围(杨伊娜等, 2022)。TDLAS 数字化监测仪使用单一频率的激光器作为光源, 能够与气体分子的吸收频率匹配, 从而具有良好的选择性和高灵敏度(陈家金, 2018)。

在 2013 年阿普安阿尔卑斯山 5.2 级地震发生前几周, 加利卡诺热矿泉监测站观测到 CO₂ 含量出现异常增长异常情况; 该监测站还在 2012 年波河平原 5.9 级群震和 2013 年皮耶韦福斯切纳 5.2 级地震前监测到明显的 CO₂ 浓度异常现象(图 8)(Pierotti et al, 2015)。此外, 研究人员在一些群震前观测到断裂带土壤逸出气和水中溶解气 CO₂ 浓度显著异常的案例, 这可能是由于地震数量较多而导致 CO₂ 前兆异常现象被放大(Weinlich et al, 2016; Gori et al, 2022)。

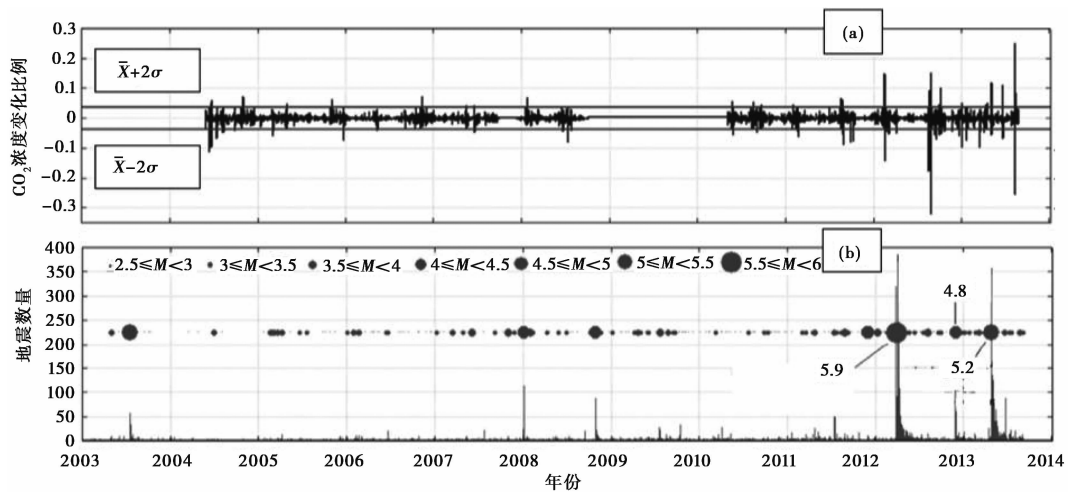


图 8 2003—2014 年加利卡诺热矿泉监测站 CO₂ 浓度波动曲线(a) 与地震事件(b)对比图(据 Pierotti 等(2015))

2012 年云南省彝良 5.7 级、5.6 级地震前, 云南大关台、四川普格台和布拖台的数字化 CO₂ 仪均监测到土壤气 CO₂ 在地震发生前三个月内出现异常增长, 并在震前一个月左右达到高峰(图 9)。此外, CO₂ 的前兆异常在短临阶段出现由外围向震中迁移的现象(何德强等, 2014)。

2014 年 10 月 7 日, 云南景谷发生 6.6 级地震。滇西鹤庆、洱源数字化监测台固体 CO₂ 测项在震前多次出现同步性异常。此外, 在历史强震和群震发生前, 两监测台的 CO₂ 也多次出现了同步性异常(图 10)(杨芬等, 2017)。

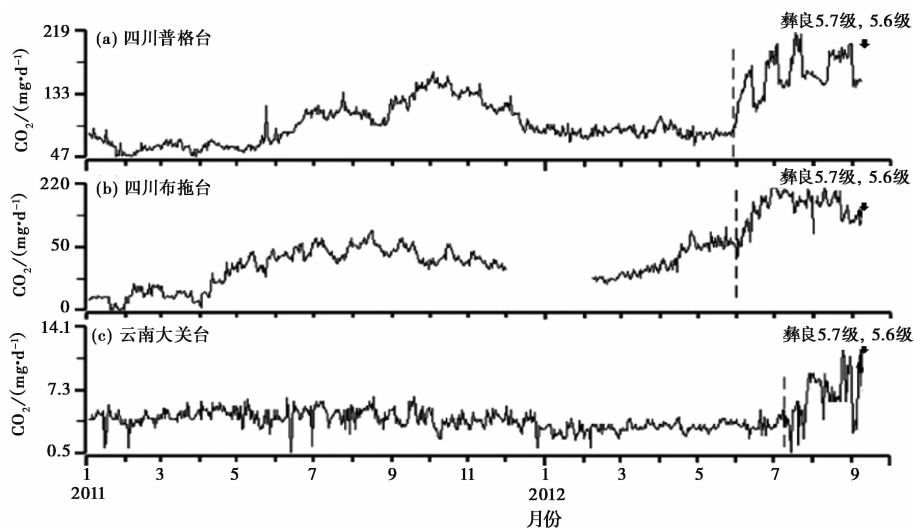


图9 2012年彝良5.7、5.6级地震前各监测点CO₂异常变化曲线(据何德强等(2014))

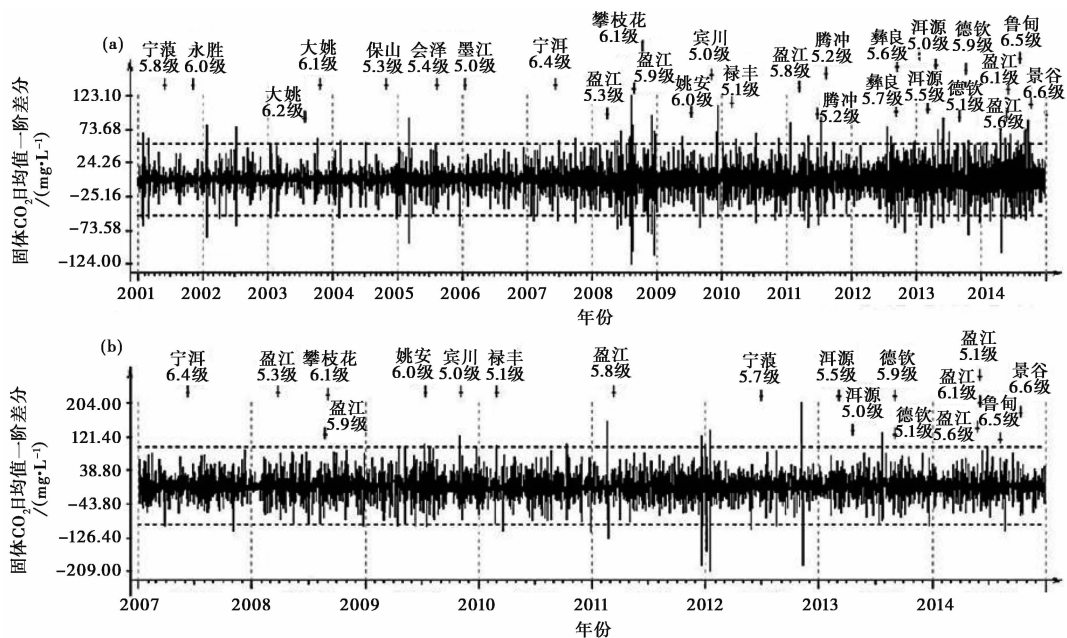


图10 滇西鹤庆台(a)、洱源台(b)固体CO₂日均值一阶差分曲线(据杨芬等(2017))

在2018年唐山古冶3.3级、2019年唐山丰南4.5级和2020年唐山古冶5.1地震前,唐山赵各庄、靳庄、北泊3个监测点同步记录到不同程度的土壤逸出气CO₂浓度异常变化(表5)。这些异常形态主要有阶跃上升、振荡式上升和突跳3种,异常峰值最大为背景值的3.8倍(张志相等,2022)。

2.4 台网简介

随着技术的发展,站点能够利用便携式气相色谱仪实时独立地对CO₂进行监测。据文献统计,气相色谱仪检测法目前已经在北京、河北、辽宁、四川、云南和新疆等省市多个监测

表 5 唐山 CO₂ 前兆异常及映震情况 (据张志相等 (2022))

地震日期	地点	震级	异常提前量/d	异常幅度/倍
2018-08-05	古冶	3.3	3	1.6
2019-12-05	丰南	4.5	8	1.6
2020-07-12	古冶	5.1	20	3.8

点普及；自 1988 年 CO₂ 快速测定管法在华北地区实验成功后，该方法凭借简便、价廉、干扰少及机动性强等特点，已在全国 18 个省市自治区推广应用，观测点达上百个，并在多个省市取得了较好的震例；数字化 CO₂ 仪在我国起步较晚，随着河北省地震局和杭州超距公司等单位公司的数字化 CO₂ 仪研发成功，该方法开始由北京、河北等省市监测点试点使用逐渐推广至全国多省市的监测站点，据文献统计，北京、天津、河北、江苏、甘肃和新疆等省市数十个监测站点已经配备了数字化 CO₂ 仪进行监测。

截至 2023 年 9 月，国家台网数据统一管理 35 个 CO₂ 观测站点，其中有 22 个站点利用 CO₂ 测量管法，有 8 个站点使用气相色谱仪测量 CO₂ 组分，有 5 个站点使用 RZW-1A 型数字 CO₂ 观测仪器监测。

3 数据处理

3.1 数据处理

地震观测数据的内涵非常丰富和复杂，不仅包含了地震科学研究需要的相关信息，也包含误差和干扰噪音。这些误差干扰的产生主要源于自然环境、人类活动、观测工作条件以及其他多种偶然因素。观测数据处理的根本目的是区分和识别信息和噪音，并抑制噪音以突出信息。在地震监测研究工作中，希望能够识别和提取有效的地震前兆异常信息，揭示不同类别观测数据之间的定量关系，为地震预测提供更明显、可靠和科学的依据。

相关分析法通过研究两个或两个以上同地位的随机变量间的关系，从而探究变量之间的关联方式及相关程度。张占阳等(2022)对观测数据与地温进行相关性分析，发现断层活动是引起唐山地震台 CO₂ 浓度和地温相关系数趋势变化的主要因素。

回归分析法是一种处理两个或两个以上变量间依存关系的统计方法，并用于说明变量间依存变化程度的定量关系。林元武等(1998b)通过建立怀来土壤中 CO₂ 释放浓度与地温的一元线性回归方程，判断出 CO₂ 变化基本受地温的影响。

此外，在地震地下流体观测资料的数据处理工作中，还有调和分析(张昭栋等,1989)、数字滤波分析(高静怀等,1996)、频谱分析以及经验模态分解法(Huang et al,1998)等多种方法。

3.2 异常识别

在断裂带 CO₂ 监测以及其他地震相关研究中，经常出现各种异常信号数据。除了误差和干扰外，异常信号中可能蕴含着重要的研究数据信息。当这些异常十分显著时，可以直接通过原始动态曲线识别(张素欣等,1998；郑云贞等,1999)；但有时这些异常隐含在正常动态之中，很难直观地识别出来，此时就需要进行一定的方法操作将异常凸显识别出来。

差分法通过对测值求取差分获取测值变化速度来寻找异常,是一种压抑较长周期、突出较短周期变化的线性滤波器。杨芬等(2017)利用差分法识别出滇西数字化监测台在云南景谷 6.6 级地震前出现的固体 CO_2 异常。

从属函数法通过获取观测曲线随时间的斜率变化的量——模糊从属函数 μ 值,来判断测值是否异常。叶秀薇(2004)利用从属函数法提取粤闽地区地下流体的地震前兆异常,共有 23 次异常与粤闽两省 5 级或中国台湾地区 6 级以上地震对应。杨兴悦等(2006)也利用从属函数法从武山 22 号井水氢资料中提取出异常,并成功对应 4 次 5.8 级以上地震。

此外,在地震地下流体观测资料的异常识别工作中,还有滑动均值异常法、概率密度分析法以及层次跟踪法等多种方法。

4 CO_2 映震特性

4.1 CO_2 浓度的映震特性

前文提及的震例均表明,断裂带 CO_2 参数异常变化可以被视为一种重要的前兆表现。在没有强震发生时,土壤逸出 CO_2 和地下流体溶解 CO_2 参数的月均值保持平稳,呈现出夏高冬低的年内波动趋势。然而,当邻近地区存在强震孕育过程时,能观察到 CO_2 参数会出现明显的前兆异常变化(王祯祥等,2002)。这些异常变化通常于震前短期或临期时间内出现,表现为偏离平均测值的持续升高或降低,整个异常过程可能持续数月甚至一年以上(上官志冠,1995a; 高清武等,1992)。

本次研究统计了 1991—2020 年 39 例地震期间的断裂带 CO_2 监测数据(表 6)。通过对以往数据综合分析后发现,断层带附近土壤中逸出的 CO_2 有很强的映震能力,甚至是断层带附近地下水中溶解 CO_2 也对地震有所反映。

断裂带 CO_2 前兆异常形态显著,主要为偏离正常年动态的突升及多点高值起伏型,整个周期多表现为“突升—多点起伏—地震发生—恢复至年动态背景值”(刘飞等,2020)。目前观察到的数据显示,突升阶段多为陡然增长(图 4(d))或阶梯式逐步升高(图 4(c)),恢复阶段多为陡然降低(图 4(d))或阶梯式逐步降低(图 4(c))。

由于地下应力在地震发生前就已经开始积累,而地下气体作为构造应力的敏感指标,因此能在应力场变化初期就产生异常变化(上官志冠,1995a; 晏锐等,2018)。断裂带 CO_2 前兆异常通常表现为地震前的中短期异常,时间主要集中在震前数天至数十天内。一般情况下,地震会发生在 CO_2 达到异常峰值后的下降过程中。通过统计震例,发现超过一半的地震 CO_2 前兆异常的提前量在一个月以内,其余一部分在数月左右(图 11)。

CO_2 异常的最高峰值通常是年均变化背景值的数倍到数十倍不等。通过对统计震例的分析,发现大多数地震 CO_2 前兆异常的幅度在年均变化背景值的数倍左右,一般集中在 2~3 倍范围内,只有个别震级较大、震中距较近的震例中出现了异常幅度达到年均变化背景值的十倍左右(图 12),具体的异常表现形态可能与观测地点的地质结构以及 CO_2 来源相关(上官志冠,1995a; 林元武等,1998b; 何德强等,2014)。

考虑到样本量因素后,本文分别对怀来(林元武等,1998b)、苏州(殷世林,2003)和长乐(林依再,2006)记录的震例信息进行多元线性回归拟合,得到这些地区震级、震中距与前兆异常提前量的决定系数 R^2 分别为 0.4、0.7、0.8,震级、震中距与前兆异常幅度的决定系数 R^2

表 6 1991—2020 年 39 例地震前兆异常信息统计

地震日期	地点	震级	震中距/km	异常提前量/d	异常幅度/倍	来源
1990-02-27	北京通县	2.6	20	57	10.0	高清武等,1992
1990-07-21	北京海坨山	4.8	150	30	4.0	高清武等,1992
1991-10-12	山西大同县东	4.3	150	18	2.9	林元武等,1998b
1991-10-05	天津宁河东	4.6	230	37	3.2	林元武等,1998b
1991-09-30	内蒙古苏尼特右旗	5.8	340	32	3.2	林元武等,1998b
1992-06-13	内蒙古阿巴戈旗	5.6	390	18	2.6	林元武等,1998b
1992-07-22	天津宁河东	4.9	240	19	3.0	林元武等,1998b
1993-08-30	山西浑源东北	4.5	150	39	2.5	林元武等,1998b
1995-07-20	河北沙城	4.0	20	15	1.3	林元武等,1998b
1995-07-22	甘肃永登	5.8	280	180	3.0	司学芸等,2011
1996-05-03	内蒙古包头西	6.4	500	16	10.0	林元武等,1998b
1998-01-10	河北张北	6.2	120	47	10.0	林元武等,1998b
1998-08-29	宁夏海原	4.9	100	120	2.0	司学芸等,2011
1999-03-20	内蒙古乌海	4.6	200	80	3.0	王祯祥等,2002
1999-09-14	四川绵竹	5.0	30	30	1.4	官致君等,2003
1999-09-19	江苏兆丰镇	2.6	3	6	2.0	殷世林,2003
2000-06-11	中国台湾南投	6.6	280	44	2.0	林依再,2006
2001-10-27	云南永胜	6.0	250	60	1.5	官致君等,2003
2001-11-03	江苏常熟—张家港	3.7	12	9	2.0	殷世林,2003
2001-12-25	江苏南通	3.9	13	15	2.0	殷世林,2003
2001-02-23	四川雅江—康定	6.0	190	180	2.0	官致君等,2003
2001-07-04	新疆呼图壁	3.9	90	9	1.2	高小其等,2004
2002-03-31	中国台湾花莲海外	7.3	340	29	3.0	林依再,2006
2002-06-13	江苏常熟—张家港	3.5	5	10	2.0	殷世林,2003
2002-08-19	江苏支塘	2.9	10	8	2.0	殷世林,2003
2003-11-13	甘肃岷县	5.2	250	90	2.0	司学芸等,2011
2003-12-10	中国台湾台东	7.0	390	30	3.0	林依再,2006
2004-10-15	中国台湾宜兰	6.4	300	31	2.0	林依再,2006
2004-11-10	福建同安	3.7	210	13	2.0	林依再,2006
2004-03-04	福建安溪	3.6	180	12	2.0	林依再,2006
2004-05-30	福建厦门海外	4.6	240	10	2.0	林依再,2006
2006-08-25	云南盐津	5.1	179	66	2.0	张立等,2007
2008-05-12	四川汶川	8.0	600	120	3.0	司学芸等,2011
2012-09-07	云南彝良	5.6	118	90	2.0	何德强等,2014
2016-05-06	云南个旧	4.7	43	121	2.0	刘飞等,2020
2018-12-05	河北古冶	3.3	<10	3	1.6	张志相等,2022
2018-08-13	云南通海	5.0	74	187	3.0	刘飞等,2020
2019-12-05	河北丰南	4.5	<10	8	1.6	张志相等,2022
2020-07-12	河北古冶	5.1	<10	20	3.8	张志相等,2022

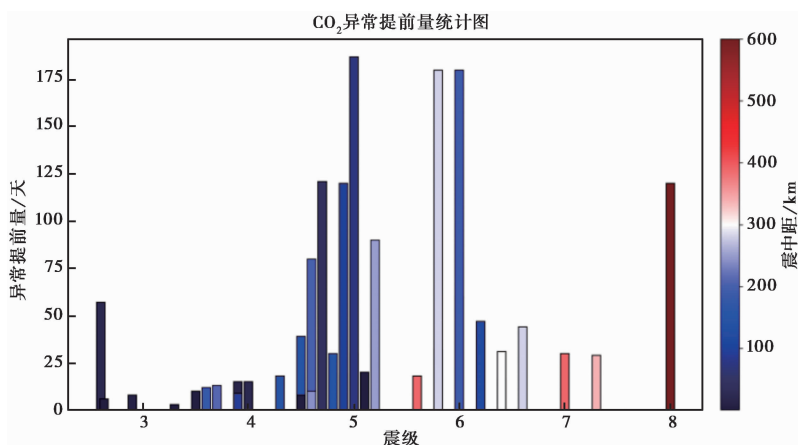


图 11 1991—2020 年 39 例地震 CO₂ 前兆异常提前量统计

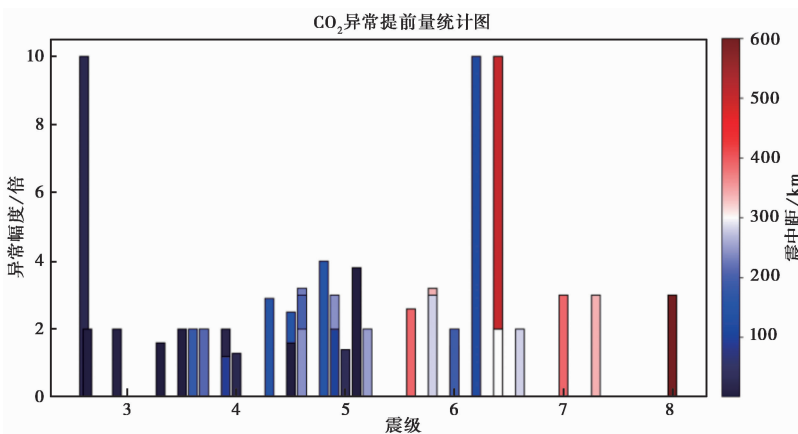


图 12 1991—2020 年 39 例地震 CO₂ 异常幅度变化量统计

分别为 0.7、1.0、0.7。该结果表明,同一地区 CO₂ 前兆异常提前量和幅度均与震级、震中距可能存在较好的相关性。

4.2 影响因素

当研究地下气体排放与地震活动之间的关系时,不得不考虑多个复杂影响因素。本节将分别总结出构造应力、温度、气压以及降水等主要因素对地下气体排放的影响。这些因素相互作用,共同塑造着地下气体的行为,为深入理解地震活动和地下气体之间的关联提供了关键见解。

4.2.1 构造应力

在 seismic 活跃地区,构造应力是地壳变形和破裂的主要推动力,是影响地下气体排放的关键因素,能够控制构造结构形成从而改变脱气途径,并成为气体运移的驱动力(Cui et al, 2019)。一些对地下 CO₂ 和地震活动数据长期监测的研究表明,无论是地下 CO₂ 的空间分布还是逸出排放,都与地下应力状态之间存在高度相关性;构造应力可以有效地调节地震活动区的地下气体排放,CO₂ 排放强度与构造应力强度呈正相关(Camarda et al, 2016; 朱成

英等,2022; Li et al,2023)。此外,上官志冠(1995b)和 Bonini(2022)研究发现,地震等构造活动还可以引发水文地质系统的持续脱气现象,持续时间与震级大小存在相关性。

4.2.2 温度和气压

温度和气压是影响地下 CO₂ 观测的重要因素,也是造成其呈现夏高冬低周期变化的主要原因(赵洁等,2023; Zhou et al,2023)。现有研究已证明,土壤气 CO₂ 浓度与温度呈正相关关系,其相关程度高,且对温度变化的响应存在一定滞后性(龚永俭等,2014; 马玉川等,2014)。另一方面,土壤气 CO₂ 浓度与气压呈负相关关系,相关程度较好(符泽宇等,2023; 孙煜杰等,2023)。因此,在对土壤气 CO₂ 观测时,必须考虑相应的温度和气压修正,以确保数据的准确性。

4.2.3 降水

降水是另一个潜在的 CO₂ 浓度影响因素,能够阻碍地下气体的运移和释放导致断层气 CO₂ 浓度的异常变化(张志相等,2022)。土壤气 CO₂ 浓度与降水量通常呈微弱的负相关关系,但由于降水因素具体作用机制复杂且存在地域性特征,在部分地区会出现两者相关程度提升的情况(龚永俭等,2014; 孙煜杰等,2023)。虽然降水因素不具有普遍性,但在进行断层气 CO₂ 浓度观测与研究时,需要因地制宜地考虑降水的影响作用,以确保对断层气 CO₂ 进行准确地观测研究。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文从历史发展、来源判定、监测技术、映震特性和影响因素几个方面介绍了断裂带 CO₂ 研究进展,得出以下结论:

(1) 地下 CO₂ 的来源可以根据形成机理主要分为三类:有机成因,即有机质在热演化过程中经过不同的地球化学作用和生物呼吸作用形成;变质成因,即碳酸盐围岩与侵入体相互作用分解或者含碳酸盐矿物岩石在地下深部高温热源作用下分解形成;幔源成因,即地幔流体中的 CO₂ 通过不同途径释放逸出。大部分断裂带 CO₂ 来自变质成因和幔源成因。

(2) 目前我国的断裂带 CO₂ 观测工作主要基于气相色谱仪法、CO₂ 快速测定法和数字化 CO₂ 仪法。气相色谱仪法起步最早、精度最高,目前已经被大量应用;CO₂ 快速测定法具有操作简便、成本低廉及机动性强等特点,是我国断裂带土壤逸出气 CO₂ 观测工作的主要方法,但该方法不能用于水中溶解气观测,观测的连续性和精度也不及其他两种方法;数字化 CO₂ 仪法在我国起步较晚,但凭借着优于气相色谱仪法的操作便捷性和优于 CO₂ 快速测定法的精确性,该方法如今得到快速推广。

(3) 断裂带 CO₂ 测项映震灵敏,在地震前的异常变化十分显著,其异常峰值在正常背景的数倍至数十倍不等。前兆异常往往出现在震前几个月或震前几天至十几天不等的时间内,而地震多发生在异常峰值出现后的缓降恢复期间或异常结束之后。无论是断层带土壤逸出的 CO₂ 还是地下水中溶解的 CO₂,均与地震存在良好的响应关系。

(4) 由于地下应力构造和外部气候环境等条件的差异,导致不同的观测点观测到的 CO₂ 浓度变化规律也不尽相同。断裂带土壤逸出气 CO₂ 浓度变化主要受地下应力影响,与地下应力强度变化呈正相关,相关性强,响应快;与温度变化呈正相关,相关性强,响应存在滞后

性;与气压变化呈负相关,相关性较好;与降水呈负相关,相关性根据环境因素变化。

5.2 讨论与展望

CO₂浓度作为地下气体观测中的重要测项,可以反映地下断层活动信息和应力状态,在地球化学研究中具有重要的地位和意义。研究人员已经证实地震的孕育和发生过程通常会引发断裂带CO₂浓度的异常变化,且通过对这些前兆异常的研究,创造了一些地震预测的成功案例。此外,断裂带CO₂浓度测项还为地震危险区段的划分和震情跟踪分析提供了重要的数据支持。然而,由于技术条件和数据样本量的限制,仍需进一步研究CO₂前兆异常与地震强度以及震中距之间的关系。

在利用断裂带CO₂进行地震预测的研究应用中,还有一些挑战亟待解决。首先,需要进一步完善观测仪器,对现有观测仪器在稳定性、连续性、准确性以及成本方面进行优化改进,以提高CO₂浓度的准确观测能力,加快先进CO₂观测设备的推广普及。其次,需要不断改进优化观测方法和数据处理方法,结合空基无人机观测和星基卫星观测等先进手段辅助观测,构建多参数、多仪器、多台站的综合观测模式,利用机器学习等方法构建CO₂逸出模型,拓宽观测数据获取的来源方法,提升数据处理和异常识别的算法能力。最后,需要建立更多样、更全面的案例数据库,以便对CO₂前兆异常与地震强度和震中距之间的关系进行更深入的研究。

通过进一步研究CO₂前兆异常,完善相关观测技术和积累数据信息,将有助于对深源地下构造运动和地震发生机制的进一步认识和理解,提高地震预测预报的准确性和可靠性,为地震灾害防治和应急响应等工作提供重要的科学依据,从而减少地震灾害对国家社会安全和人民生命财产造成的损失。

参考文献

- 车用太,鱼金子. 2006. 地震地下流体力学. 北京:气象出版社.
- 陈家金. 2018. 基于长光程激光吸收光谱痕量气体及同位素探测技术研究. 博士学位论文. 合肥:中国科学技术大学.
- 戴金星. 1993. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别. 天然气地球科学,4(2):1~40.
- 戴金星. 1995. 中国含油气盆地的无机成因气及其气藏. 天然气工业,15(3):22~27.
- 杜建国,刘丛强. 2003. 同位素地球化学在地震研究方面的作用. 地震,23(2):99~107.
- 符泽宇,刘燕翔,李金,等. 2023. 唐山断裂带土壤断层气CO₂浓度的映震效能. 地震地磁观测与研究,44(4):85~94.
- 高静怀,汪文秉,朱光明,等. 1996. 地震资料处理中小波函数的选取研究. 地球物理学报,39(3):392~400.
- 高清武,范树全. 1992. 夏垫断裂断层气在地震前的异常反映. 地震,12(6):73~76.
- 高小其,王道,许秋龙,等. 2002. CO₂快速测定方法的应用研究. 内陆地震,16(1):76~83.
- 高小其,王海涛,赵建政,等. 2004. 地震危险区短临跟踪的一种有效观测手段——地下岩土气体CO₂观测在新疆地区的应用. 华北地震科学,22(1):31~37.
- 龚永俭,程立康,李越,等. 2014. 断层土壤气CO₂含量快速测定法关键问题探讨. 华北地震科学,32(1):47~52.
- 官致君,闻学泽,程万正. 2002. 断层气CO₂测点选建及观测资料在四川绵竹、雅江地震前的反映. 四川地震,(4):22~27.
- 官致君,闻学泽,程万正. 2003. 断层气CO₂快速测定方法在四川地震预测中的应用. 地震研究,26(增刊):118~125.
- 何德强,李亚芳,余如昌,等. 2014. 2012年9月7日彝良5.7、5.6级地震的近场异常. 地震研究,37(1):1~8.
- 孔令昌. 1996. 地下水中气体动态变化与地震的关系. 华北地震科学,14(1):64~71.
- 李其林,王云,赵慈平,等. 2019. 云南省香格里拉市下给和天生桥温泉水化学和逸出气CO₂释放特征变化. 地震研究,42(3):320~329.
- 李营,陈志,胡乐,等. 2022. 流体地球化学进展及其在地震预测研究中的应用. 科学通报,67(13):1404~1420.

- 李志鹏,刘仕锦. 2012. 四川康定龙头沟温泉 CO₂ 突降异常与地震活动关系. 地震地磁观测与研究, **33**(2):80~83.
- 林依冉. 2006. 长乐筹东 CO₂ 观测方法与地震前兆异常初探. 地震研究, **29**(1):30~34.
- 林元武,刘五洲,王基华,等. 1998a. 张北-尚义地震现场 CO₂ 测量与震后趋势判断. 地震地质, **20**(2):117~121.
- 林元武,王基华,高松升. 1998b. 断层气 CO₂ 测定新方法 with 张北-尚义 6.2 级地震预报. 地震, **18**(4):353~357.
- 刘春国,晏锐,樊春燕,等. 2022. 我国地震地下流体监测现状分析及展望. 地震研究, **45**(2):161~172.
- 刘飞,祁燕. 2020. 云南省红河地区断层气 CO₂ 观测及其与地震关系初探. 四川地震, (4):28~31.
- 刘峰立,周晓成,李营,等. 2023. 鲜水河—小江断裂带土壤气地球化学特征. 地震研究, **46**(1):1~12.
- 刘雷,杜建国,周晓成,等. 2012. 青海玉树 M_s7.1 地震震后断层流体地球化学连续观测. 地球物理学进展, **27**(3):888~893.
- 刘耀炜,任宏微,张磊,等. 2015. 鲁甸 6.5 级地震地下流体典型异常与前兆机理分析. 地震地质, **37**(1):307~318.
- 马玉川,孙小龙,王博,等. 2014. 四川布拖土壤 CO₂ 多年释放特征及影响因素. 地震, **34**(4):30~39.
- 荣建东. 1982. 地下流体与地震. 地震学刊, (4):69~70.
- 上官志冠. 1995a. 地热流体溶解 CO₂ 总量参数的地震前兆特征. 科学通报, **40**(9):814~817.
- 上官志冠. 1995b. 深源二氧化碳预报地震研究. 地震地质, **17**(3):214~217.
- 上官志冠,高松升. 1990. 滇西地区二氧化碳的释放与地震. 地震学报, **12**(2):186~193.
- 上官志冠,高松升,刘桂芬. 1992. 地热流体溶解二氧化碳总量观测方法. 地震, **12**(5):21~28.
- 上官志冠,刘桂芬,高松升. 1993. 川滇块体边界断裂的 CO₂ 释放及其来源. 中国地震, **9**(2):146~153.
- 石慧馨,蔡祖煌. 1980. 在我国发现的地震前地下流体异常的实例. 地震学报, **2**(4):425~429.
- 司学芸,李英,姚琳. 2011. 固原硝口温泉 CO₂ 气体异常与映震效应. 地震地磁观测与研究, **32**(3):88~94.
- 孙煜杰,彭澎,张荣杉,等. 2023. 江苏宿迁台断层气 CO₂ 浓度特征及影响因素分析. 四川地震, (2):18~22.
- 王基华,林元武,高松升,等. 2000. 1998 年怀来后郝窑断层气 CO₂ 变化特征分析. 西北地震学报, **22**(1):28~32.
- 王云,赵慈平,冉华,等. 2015. 地壳流体 CO₂ 的释放与地震关系: 回顾与展望. 地震研究, **38**(1):119~130.
- 王祯祥,燕志强. 2002. 乌海 4.6 级地震前断层气 CO₂ 异常特征分析. 华北地震科学, **20**(3):36~39.
- 晏锐,田雷,王广才,等. 2018. 2008 年汶川 8.0 级地震前地下流体异常回顾与统计特征分析. 地球物理学报, **61**(5):1907~1921.
- 杨芬,王军. 2017. 2014 年云南景谷 6.6 级强震前中短临异常特征和短临预测. 国际地震动态, (12):16~24.
- 杨兴悦,王燕,闫万生. 2006. 武山 22 号井水氢中期异常与地震关系的探讨. 西北地震学报, **28**(4):379~380.
- 杨伊娜,郝建淦,郑晓虹. 2022. 二氧化碳气体传感器的研究进展. 功能材料与器件学报, **28**(3):187~199.
- 叶秀薇. 2004. 粤闽地区地下流体从属函数异常与地震关系的初步研究. 防灾减灾工程学报, **24**(2):195~201.
- 殷世林. 2003. 断层逸出气 CO₂ 的有感小震前兆异常及预报意义. 防灾减灾工程学报, **23**(2):76~79.
- 鱼金子,车用太,刘五洲. 1998. 地壳中的 CO₂ 及其释放与地震短临预测. 国际地震动态, (8):9~14.
- 张立,申玻,官致君,等. 2007. 盐津地震流体前兆异常分析. 地震, **27**(2):121~129.
- 张素欣,王吉易,郑云贞. 1998. 唐山地震前后水氢变化率动态图象的特征分析. 西北地震学报, **20**(3):23~27.
- 张翔,付虹,罗睿洁. 2019. 滇西大理地区温泉溶解二氧化碳及碳同位素特征. 国际地震动态, (8):159~160.
- 张占阳,周铭辉,高艳龙,等. 2022. 基于 Pearson 相关系数分析唐山台断层 CO₂ 浓度与地温相关性及其与地震的关系. 内陆地震, **36**(3):227~236.
- 张昭栋,王宝银,高玉斌,等. 1989. 中国地下水潮汐的观测研究和分析. 地震学报, **11**(4):392~401.
- 张志相,王江,张帆,等. 2022. 唐山地区断层土壤气体 CO₂ 连续观测台阵数据分析. 华北地震科学, **40**(4):69~76.
- 赵洁,苏鹤军,周卫东,等. 2023. 西秦岭北缘断裂带断层土壤气观测分析. 高原地震, **35**(1):1~9.
- 郑云贞,王吉易,张素欣. 1999. 大同地震水氢动态图象的前兆异常特征. 地震, **19**(1):90~96.
- 朱成英,闫玮,麻荣,等. 2022. 2017 年 8 月 9 日精河 M_s6.6 地震宏观烈度及其余震分布的断层气体地球化学表征. 地震地质, **44**(5):1225~1239.
- 左银辉,郑紫芸,邵大力,等. 2021. 二氧化碳成因、成藏主控因素及脱气模式研究综述. 科学技术与工程, **21**(29):12356~12367.
- Bonini M. 2022. Can coseismic static stress changes sustain postseismic degassing?. *Geology*, **50**(3):371~376.

- Camarda M, De Gregorio S, Di Martino R M R, et al. 2016. Temporal and spatial correlations between soil CO₂ flux and crustal stress. *J Geophys Res: Solid Earth*, **121**(10): 7071~7085.
- Chen Z, Li Y, Liu Z F, et al. 2019. Evidence of multiple sources of soil gas in the Tangshan fault zone, North China. *Geofluids*, **2019**: 1945450.
- Cui Y J, Li Y, Si X Y, et al. 2019. Tectonic controls on near-surface variations in CH₄ and CO₂ concentrations along the northwestern margin of the Ordos Block, China. *Geofluids*, **2019**: 7909483.
- Fu C C, Yang T F, Chen C H, et al. 2017. Spatial and temporal anomalies of soil gas in northern Taiwan and its tectonic and seismic implications. *J Asian Earth Sci*, **149**: 64~77.
- Fu C C, Yang T F, Walia V, et al. 2005. Reconnaissance of soil gas composition over the buried fault and fracture zone in southern Taiwan. *Geochem J*, **39**(5): 427~439.
- Gori F, Barberio M D. 2022. Hydrogeochemical changes before and during the 2019 Benevento seismic swarm in central-southern Italy. *J Hydrol*, **604**: 127250.
- Currier S, Liuzzo M, Giuffrida G, et al. 2021. The first observations of CO₂ and CO₂/SO₂ degassing variations recorded at Mt. Etna during the 2018 eruptions followed by three strong earthquakes. *Italian J Geosci*, **140**(1): 95~106.
- Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc Roy Soc A Math Phys Eng Scis*, **454**(1971): 903~995.
- Hutcheon I, Abercrombie H. 1990. Carbon dioxide in clastic rocks and silicate hydrolysis. *Geology*, **18**(6): 541~544.
- Irwin W P, Barnes I. 1980. Tectonic relations of carbon dioxide discharges and earthquakes. *J Geophys Res: Solid Earth*, **85**(B6): 3115~3121.
- Li X Y, Liu X P, Zeng X W, et al. 2023. Spatial variations of Rn and CO₂ emissions in the Wuzhong-Lingwu region, northwest China. *Front Earth Sci*, **11**: 1100039.
- Pierotti L, Botti F, D'Intinosante V, et al. 2015. Anomalous CO₂ content in the Galliciano thermo-mineral spring (Serchio Valley, Italy) before the 21 June 2013, Alpi Apuane earthquake ($M=5.2$). *Phys Chem Earth, Parts A/B/C*, **85~86**: 131~140.
- Sadovsky M A, Nersesov I L, Nigmatullaev S K, et al. 1972. The processes preceding strong earthquakes in some regions of Middle Asia. *Tectonophysics*, **14**(3~4): 295~307.
- Sciarra A, Cantucci B, Coltorti M. 2017. Learning from soil gas change and isotopic signatures during 2012 Emilia seismic sequence. *Sci Rep*, **7**(1): 14187.
- Sugisaki R, Ido M, Takeda H, et al. 1983. Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity. *J Geol*, **91**(3): 239~258.
- Troll V R, Hilton D R, Jolis E M, et al. 2012. Crustal CO₂ liberation during the 2006 eruption and earthquake events at Merapi volcano, Indonesia. *Geophys Res Lett*, **39**(11): L11302.
- Wei F X, Xu J D, Shangguan Z G, et al. 2016. Helium and carbon isotopes in the hot springs of Changbaishan Volcano, northeastern China: a material connection between Changbaishan Volcano and the west Pacific plate?. *J Volcanol Geotherm Res*, **327**: 398~406.
- Weinlich F H, Gaždová R, Teschner M, et al. 2016. The October 2008 Nový Kostel earthquake swarm and its gas geochemical precursor. *Geofluids*, **16**(5): 826~840.
- Xu J D, Liu G M, Wu J P, et al. 2012. Recent unrest of Changbaishan volcano, northeast China: a precursor of a future eruption?. *Geophys Res Lett*, **39**(16): L16305.
- Zhang M L, Guo Z F, Sano Y, et al. 2015. Stagnant subducted Pacific slab-derived CO₂ emissions: insights into magma degassing at Changbaishan volcano, NE China. *J Asian Earth Sci*, **106**: 49~63.
- Zhou H L, Su H J, Li C H, et al. 2023. Geochemical precursory characteristics of soil gas Rn, Hg, H₂, and CO₂ related to the 2019 Xiahe $M_s 5.7$ earthquake across the northern margin of West Qinling Fault zone, Central China. *J Environ Radioact*, **264**: 107190.
- Zhou X C, Chen Z, Cui Y J. 2016. Environmental impact of CO₂, Rn, Hg degassing from the rupture zones produced by Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake in western Sichuan, China. *Environ Geochem Health*, **38**(5): 1067~1082.

Review of CO₂ Observation and Research on Seismic Fault Zones in China

Peng Lai^{1,2)}, Fan Chunyan³⁾, Wang Qian²⁾, Jiang Yuhan²⁾, Zhou Qichao^{1,2)},
Gao Xiaoqi^{1,2)}

1) School of Emergency Management Science and Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2) Key Laboratory of Crustal Dynamics, National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract CO₂ have long been recognized as indicators of deep Earth activity and are extensively used in the study of fault dynamics and tectonic movements. This article explores the chemical characteristics of deep-sourced CO₂, examining the three primary formation mechanisms—organic origin, metamorphic origin, and mantle origin—and methods for determining their sources. The study concludes that CO₂ in fault zones primarily originates from metamorphic and mantle sources. The paper reviews the progress of CO₂ observation in fault zones through three monitoring techniques: gas chromatography, CO₂ detector tubes, and digital CO₂ analyzers. It also outlines data processing and anomaly detection methods used in these studies. By analyzing earthquake case studies, the research demonstrates that CO₂ concentrations in fault zones can increase several times—often by a factor of ten or more—compared to background levels in the months or days preceding an earthquake. Finally, the study discusses the factors influencing CO₂ release from fault zones. CO₂ concentration is found to be positively correlated with underground stress intensity and temperature, while it is negatively correlated with atmospheric pressure and precipitation.

Keywords: Earthquake Fault zone; CO₂; Fault soil gas