



流体地球化学进展及其在地震预测研究中的应用

李莹^{1*}, 陈志¹, 胡乐¹, 苏淑娟², 郑辰禾³, 刘兆飞⁴, 路畅¹, 赵影⁵, 刘洁⁶, 何鸿毅¹, 孙凤霞¹, 徐超文¹, 周晓成¹, 杜建国¹, 徐胜⁷, 郑国东⁸

1. 中国地震局地震预测研究所, 中国地震局地震预测重点实验室, 北京 100036;
2. 山东省地震局烟台地震监测中心站, 烟台 264000;
3. 福建省地震局, 福州 350003;
4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
5. 江西省地震局, 南昌 330026;
6. 陕西省地震局, 西安 710068;
7. 天津大学地球系统科学学院, 地表地球系统科学研究所, 天津 300072;
8. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

* 联系人, E-mail: liy@ief.ac.cn

2021-09-13 收稿, 2021-12-12 修回, 2021-12-13 接受, 2021-12-14 网络版发表

摘要 地震预测是仍未解决的世界性难题. 流体地球化学是地震预测的潜在手段之一, 近年来得到了较为广泛的认可与运用. 地震的孕育和发生过程始终伴随着地下物质运移、能量传输和条件改变, 从而导致流体中元素和同位素的迁移与演化, 进而形成地表可观测到的流体地球化学异常. 活动断裂带是地震多发区, 同时也是深部流体运移和释放的有利通道. 活动断裂带流体的地球化学特征对地壳应力、温压条件和渗透率的变化极其敏感, 可以作为指示构造或地震活动的良好指标. 流体地球化学与断裂活动的密切关系使得流体地球化学不仅在地震预报中发挥着重要作用, 也是解释地震过程中物质来源、能量交换和条件变化的有效手段. 此外, 新的地球化学分析技术的迅速发展, 使其在研究地震前兆机理和地震物理过程中发挥越来越重要的作用. 本文在综述近年来流体地球化学在地震预测领域研究进展的基础上, 结合自身团队的研究结果和认识, 提出未来地震地球化学研究的发展方向.

关键词 地震, 地震流体, 流体地球化学异常, 地震预测

流体是地球系统中最为活跃的物质组分, 是地球各圈层相互联系的有效介质, 在地球演化历程中发挥重要作用^[1]. 固体地球内部的流体主要包括矿物/岩石间、矿物晶格中或晶格间的气态(如H₂O、CO₂、稀有气体等)和液态物质. 在其形成演化过程中, 受控于外部环境的改变, 易发生物理化学变化, 这一特性使得流体在地球科学各分支学科研究中均占有重要地位^[2]. 地震预测是仍未解决的世界性科学难题, 在已有地震预测

或相关研究中, 流体也得到了较为广泛的重视和运用, 主要包括流体物理和流体地球化学两方面, 前者主要涉及水温、水位等对地震活动的响应过程, 后者主要研究地震孕育发生过程中伴生的各种流体地球化学变化以及流体与地震活动之间的关系^[3].

地震孕育和发生的过程是深部物质运移、能量传输、条件改变的过程, 也是应力加载下孕震介质中流体与岩石之间复杂的物理化学过程, 必然伴随着流体

引用格式: 李莹, 陈志, 胡乐, 等. 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, 2022, 67: 1404–1420

Li Y, Chen Z, Hu L, et al. Advances in seismic fluid geochemistry and its application in earthquake forecasting (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 1404–1420, doi: [10.1360/TB-2021-0955](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0955)

中元素和同位素的迁移、分异、演化^[4-7]。伴随这一过程,流体将地下深部信号带到地表,自身化学、同位素组成的异常对地震孕育的动力学响应是流体地球化学地震预测的基本原理。活动断裂带是地震孕育和发生的关键区域,同时也是地下流体运移和逸出的重要地带^[8-10]。近年来,由于测试分析技术的不断进步,活动断裂带流体地球化学方法已被广泛运用到构造活动性分析、地震危险区的地震活动趋势判定,以及地震监测预测理论和方法的研究中,取得了大量的研究进展,并在地震前兆研究中占据重要地位^[11]。为了总结和促进相关领域的科技进步,本文从流体地球化学与构造活动的关系、地震流体异常及其在地震预测中的运用、新技术手段的使用等方面对这些进展进行总结和概述,并对未来研究方向作出展望。

1 流体地球化学与构造活动关系

地下流体在浓度差和温度、压力变化的驱动下沿着活动断裂等薄弱地带在岩石圈内发生扩散、对流^[12,13],并携带地球深部的有关信息释放出地表。从全球尺度来看,气体强烈排放带与板块缝合带、火山带、地热带和地震带等都有极高的重合度^[14]。如在美国、日本、意大利、新西兰、中国台湾等国家和地区的相关研究均观察到了板块缝合带断裂显著的土壤气排放异常和剧烈的地热田热水周期性喷发活动^[15-19];我国的青藏高原,受控于印度板块与欧亚板块碰撞作用的持续影响,也是地球脱气的主要场所^[20]。此外,天然气渗漏研究也表明,全球主要烃类气体排放点的分布与泥火山、含气温泉和地震带分布相吻合^[21]。除气

体浓度、通量特征外,全球主要构造带还观察到具有较高 B^+ 、 Ba^{2+} 、 Li^+ 、 $\delta^{18}O$ 、 $^3He/^4He$ 、 $\delta^{13}C$ 、 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 、 Cl^-/SO_4^{2-} 浓度与比值特征的流体存在。研究表明,这些较高的特征值主要源自流体与深部岩石的交代作用^[22-24]。因此,发育在板块汇聚地带的大型活动断裂,特别是深切断裂,是地球内部流体释放的主要通道,总体控制了地球的气体排放。

在区域尺度,流体的释放也受局部断裂构造的控制。加纳东南部断裂发育地区的土壤气Rn浓度最高可达 115 kBq/m^3 ,而在周边没有断层的地区则低于 20 kBq/m^3 ^[25]。对准噶尔盆地南缘泥火山研究发现,区域断裂控制了 CO_2 和 CH_4 的释放,且4个背斜褶皱的输出通量分布与区域构造活动强度非常一致^[26](图1);中国大陆活动构造发育的南北地震带、张家口-渤海湾(张渤)地震带、北天山地震带等也都是重要的脱气带(表1),且气体释放强度与断裂活动程度密切相关^[55];在具备更丰富气体运移通道的断裂带交汇部位,气体浓度值往往也更高^[56]。在水热活动区,大气降水及地表水通过活动断裂(可至地幔)进行深部循环,通过混合、溶解、解析、水岩反应等过程,不断地将深部信息携带至近地表,成为解译深部动力学过程的特殊密码。在川西高原火山地热区,沿断裂带分布约250个温泉,研究者通过对典型温泉气体组分及同位素的研究指出,地幔尺度动力学参与了青藏高原的侧向扩张和局部地表抬升过程^[57,58]。

除与构造断裂带的分布紧密相关外^[59],流体地球化学特征也与断裂本身的应力状态差异所产生的裂隙结构和渗透性差异存在关联^[60]。断裂在不同应力状态

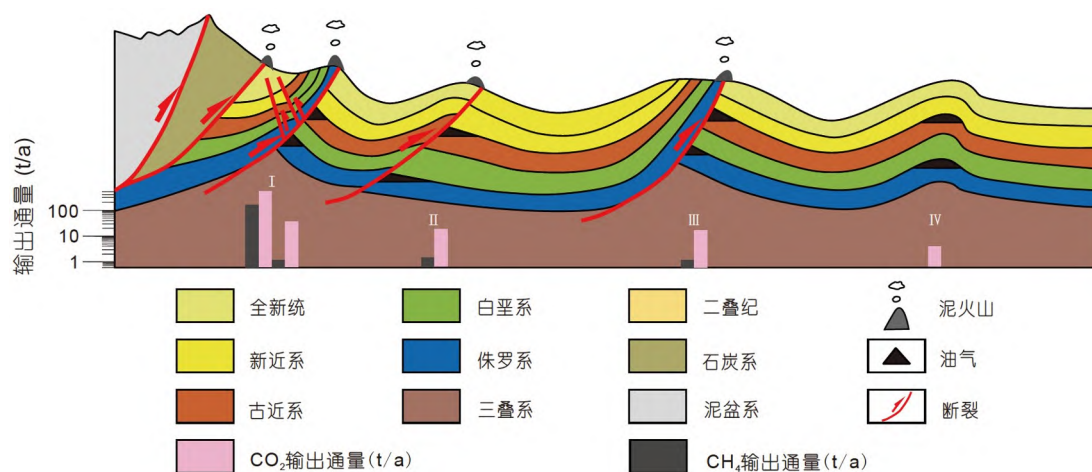


图1 准噶尔盆地地区断裂控制 CO_2 与 CH_4 的释放模型图^[26]

Figure 1 The model of regional faults in the Junggar Basin control the release of CO_2 and CH_4 ^[26]

表1 国内外部分活动断裂带气体浓度特征^{a)}

Table 1 Gas concentrations of some active fault zones in the world

区域	断裂带名称	Rn(kBq/m ³)		CO ₂ (%)		Hg(ng/m ³)		文献
		平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	
国内	五大连池火山区	0.17	0.11~0.24	59.80	0.51~98.47	-	-	[27]
	朝阳-北票断裂	4.82	1.03~18.15	0.64	0.10~4.53	-	-	[28]
	唐山断裂带	5.55	0.41~38.47	0.28	0.05~0.17	12.00	2.00~61.00	[29,30]
	延怀盆地	8.11	1.30~57.81	0.40	0.33~0.57	9.70	1.00~54.00	[30,31]
	夏垫断裂	25.51	2.12~63.38	0.69	0.09~2.16	9.16	3.00~34.00	[32]
	新保安-沙城断裂带	12.51	0.31~18.22	0.78	0.05~1.19	17.50	2.00~54.00	[30]
	怀安盆地北缘断裂东段	4.81	0.26~19.69	0.38	0.09~2.79	9.00	2.00~83.00	[33]
	蔚县-广灵断裂	7.15	1.09~13.45	0.43	0.15~1.10	14.50	4.00~64.00	[34]
	六棱山断裂	1.53	2.88~8.34	0.26	0.15~0.50	6.50	4.00~27.00	[33]
	口泉断裂	9.47	7.46~20.99	0.37	0.21~0.42	14.15	7.00~26.00	[34]
	大同火山	7.08	5.27~9.75	0.22	0.16~0.26	13.00	9.00~19.00	[33]
	阳高-天镇断裂	9.69	2.99~18.54	0.38	0.24~0.80	7.60	5.00~10.00	[33]
	阳泉盆地北缘断裂	10.72	3.60~18.55	0.79	0.26~2.05	14.00	6.00~29.00	[33]
	吉林泰-临河断陷盆地	6.90	0.41~16.20	0.15	0.05~0.38	11.00	5.00~74.00	[35]
	呼包盆地东北边缘	2.92	2.19~3.72	-	-	47.36	21.10~79.40	[36]
	银川-贺兰山断裂带	7.93	1.34~30.76	0.89	0.14~5.27	17.50	6.00~99.00	[35]
	海原弧形断裂带	5.80	1.43~59.76	0.15	0.06~0.32	50.40	7.00~92.00	[35]
	西秦岭北缘断裂	1.93	0.60~4.28	-	-	2.54	0.92~3.83	[37]
	刘家堡断层	1.97	0.09~13.37	-	-	40.07	16.00~457.00	[38]
	金城关断裂带	10.73	8.47~53.67	-	-	0.40	0.10~1.45	[39]
	郟庐断裂带山东段	17.79	15.40~48.58	0.39	0.32~1.78	5.20	2.20~34.00	[40]
	阿尔金断裂	58.86	6.00~139.00	0.31	0.04~0.71	14.59	14.17~15.00	[41]
	北天山褶皱带泥火山	-	-	5.01	1.10~18.00	-	-	[26]
	汶川地震破裂带	11.37	0.04~106.64	1.31	0.04~9.88	13.50	1.00~73.00	[42]
	安宁河-则木河断裂	12.02	7.67~18.87	0.37	0.04~2.41	-	-	[43,44]
	中国西藏玛曲断裂带	6.18	3.12~25.40	-	-	0.11	0.06~0.24	[45]
	Hsinchu-Hsincheng断裂	-	6.60~32.20	-	0.10~34.80	-	-	[46]
	Hsinhua断裂	29.46	0.70~40.60	3.34	0.00~13.84	-	-	[47]
国外	尼泊尔中部喜马拉雅山前断裂	37.50	25.00~60.00	0.80	0.73~0.86	-	-	[48]
	意大利S.Martino-Costa断裂	52.90	0.00~314.10	1.20	0.03~7.10	-	-	[49]
	意大利Ofanto峡谷	17.00	0.70~97.30	1.33	0.13~15.10	-	-	[50]
	意大利Fucino平原	19.40	0.00~119.51	3.35	0.02~20.54	-	-	[51]
	斯洛文尼亚Ravne断裂	13.40	0.90~32.90	-	-	-	-	[52]
	印度米佐拉姆Mat断裂	1.17	0.25~6.21	-	-	-	-	[53]
	西班牙加那利群岛 El Hierro火山断裂	1.15	0.00~23.76	-	-	-	-	[54]

a) “-”表示无测值

控制下会发展出不同的结构，从而在断裂上方表现出不同的流体地球化学分布特征。拉张应力为主导的正

断层上方通常为碎裂岩和角砾岩等，其上盘一侧常发育有许多与主断面对倾的次级小断层，为流体向地表

的运移提供了通道, 从而在断层上方形成土壤气单峰或者多峰聚集模式, 并且浓度呈现向断层上盘一侧递减的分布特征. 挤压应力主导的逆断层核部通常充填断层泥, 渗透率低, 不易于流体运移释放, 上盘破裂发育程度较大, 所以跨断层气体浓度形态多呈现在接近断层的上盘增加, 但在断层处突然下降, 下盘一侧的浓度相对较低的特征. 受拉张应力影响的走滑断层, 其土壤气浓度在断层处相对较高, 常形成单峰异常, 并随着与断层距离的增加而逐渐降低. 对于受挤压应力影响的走滑断层, 断层核部“闭合”, 断层面土壤气浓度则相对较低, 并随着与断层距离的增加而逐渐增加(图2)^[61]. 不同类型的气体, 由于初始浓度与扩散速率差异也会影响其在断层上方的地球化学分布特征, 如在意大利 Etna 火山 Pernicana 断层的主断面上观察到了在 CO₂ 稀释作用影响下形成的 ²²²Rn 低值^[62].

由上述可知, 流体对岩石圈动力学过程具有独特的示踪作用, 其化学和同位素组成的空间变化与活动断裂带深部地质过程, 断裂带类型、规模及活动强度等密切相关. 流体在构造应力加载下产生变化, 在应力

驱动下扩散运移, 最终沿断裂通道释放, 形成具有时空分布状态的地球化学特征. 反之, 断裂活动状态的变化也会不断影响流体的演化与迁移过程. 流体地球化学与构造活动的紧密关系是进行流体地震预测的理论基础.

2 地震流体地球化学异常

如前所述, 活动断裂带既是地下流体逸出的通道, 也是地震孕育和发生的主要场所. 在地震形成过程中, 由于应力应变作用的改变, 导致地壳表层水、气体、土壤等介质中的化学元素及同位素发生复杂的时间-空间变化, 即地震流体地球化学异常. 近年来, 在全世界地震工作者的共同努力下, 地震流体地球化学观测和研究的广度与深度都在不断增加^[3,11], 有记载的地球化学异常数量也在快速增加, 流体地球化学异常与地震活动在时空上的关联性进一步被证实^[19,56,63-67](图3).

2.1 气体地球化学异常

活动断裂带气体地球化学特征常与区域内地震活

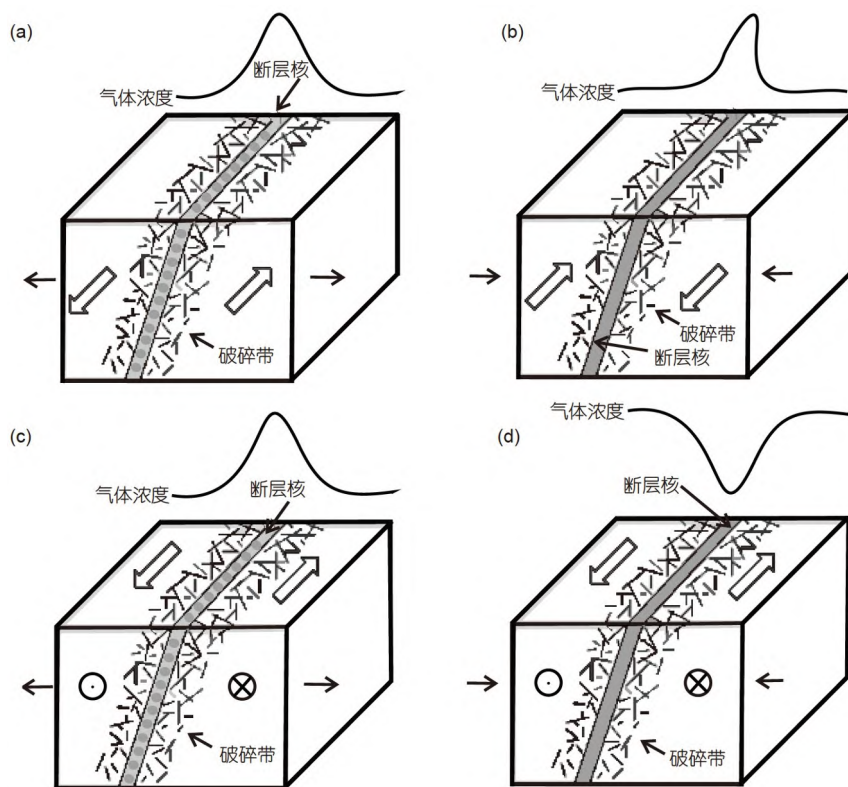


图2 不同应力状态控制下断层的土壤气Rn分布图^[61]. (a) 正断层; (b) 逆断层; (c) 张扭断层; (d) 压扭断层

Figure 2 Distribution of Rn concentration in soil gas in faults under different strain regimes^[61]. (a) A normal fault; (b) a thrust fault; (c) a transensional fault; (d) a transpressional fault

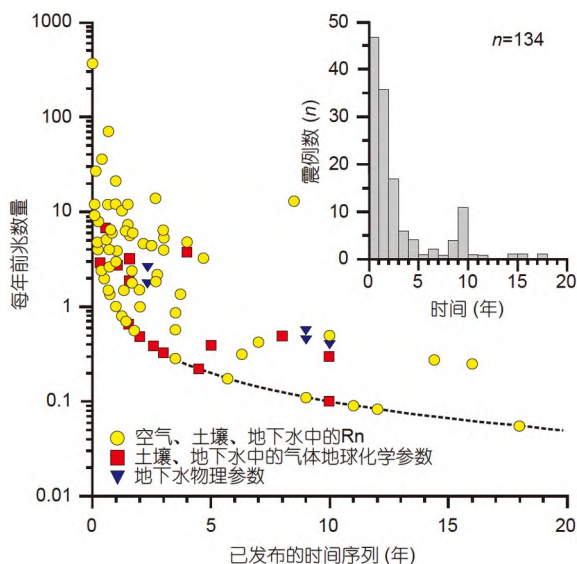


图3 1995~2014年全球地震流体地球化学前兆数量统计图^[67]
Figure 3 Statistical data of global seismic fluid geochemical precursors from year 1995 to 2014^[67]

动密切相关^[68~71]。断裂带土壤气体(CO_2 、 CH_4 、 Rn 、 Hg 等)在地震前后经常出现异常现象^[19,72],其异常幅度也常随着地震活动的变化而变化^[42,73,74]。意大利L'Aquila地区6.3级地震及2000个余震前后,断裂带 CO_2 通量与地震活动之间的关系研究表明,通过断裂带释放的 CO_2 气体在地震的孕育、发生及余震活动过程中发挥了重要作用^[74]。巴基斯坦Muzaffarabad断裂开展的土壤气体 Rn 浓度的持续观测显示,断裂周边7个0.8~4.9级地震前30 d左右出现 Rn 浓度异常现象^[75]。汶川地震发生后,发震断裂带科学钻探一号孔(WFSD-1)和二号孔(WFSD-2)的钻探过程中,土壤气体 He 、 CH_4 、 Rn 、 H_2 和 Hg 浓度的异常与周边余震密切相关^[73,76];龙门山断裂带的土壤气体 He 和 H_2 的异常幅度也随余震活动强度的降低而降低^[42]。

断裂带的温泉气体地球化学特征也是指示地震活动的一种潜在指标^[63,68,77]。温泉气体的浓度(H_2 、 He 、 Rn 、 CO_2 等)在地震前后常发生明显的变化^[63,78]。2008年西藏6.9级地震前,印度Bakreswar和Tatta Pani的两个温泉都观测到明显的气体 He 和 Rn 浓度异常^[63]。近年来,研究者通过对则木河断裂附近的螺髻山温泉逸出 H_2 进行连续自动监测,发现天然地震前存在短期(5~60 h) H_2 浓度地震前兆异常^[66]。此外,温泉气体中稳定同位素的比值($^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$)在地震前后也可能发生变化^[68,77]。中国川西地区地震频发,不同温泉点气体同位

素组成也具有一定差异,其中,温泉气体的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值越大,其所在位置地震发生的频率也越高^[79]。金沙江-红河断裂带附近54个温泉气的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 特征表明,金沙江-红河断裂带幔源物质的上涌释放与区域地震活动性具有很好的对应关系,并对区域地震的孕育和发生具有促进作用^[80]。日本岩手-宫城县7.2级地震后,震中附近温泉气体中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值一周内增加幅度达10%~85%,且异常的持续时间长达半年,这与地震导致的含有原始 ^3He 流体的地幔物质上涌息息相关^[5]。

2.2 地下水地球化学异常

研究发现,地震前后的应力变化会引发断裂带附近温泉水、井水和地下水等的水化学离子(Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 TDS (total dissolved solid)等)发生明显变化^[81,82]。新西兰阿尔卑斯山脉的Copland温泉在2010年Darfield 7.1级地震之后,温泉水中的 Cl^- 、 Li^+ 、 B^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ba^{2+} 等浓度显著降低,而 SO_4^{2-} 浓度对应上升^[83]。1998年,土耳其Adana 6.8级地震后Cokcapinar地区TR167号井水的 Na^+ 、 Cl^- 浓度在震后一周内上升至震前浓度近两倍^[64]。2008年汶川地震前,康定地区32个温泉水样品中 K^+ 和 SO_4^{2-} 的浓度明显增加,随着余震活动减弱,震中附近的泉水水化学参数降低了20%以上;2012年芦山地震后,其中6个泉水样品中的 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 和 TDS 浓度又显著升高^[77]。地震震中附近温泉水、井水和地下水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 也是指示地震活动的良好指标^[84,85]。2005年印度Koyna 5.1级地震后,Koyna和Warna两个水库周边的井水 $\delta^{18}\text{O}$ 出现了明显下降的趋势^[84]。汶川地震发生后,孕震断裂带附近地下水中 δD 值与该断裂带上4.0级以上地震有一定相关性, δD 值往往在震前一周左右开始下降,且变化幅度随震级增大而增大^[86]。2012年冰岛北部连续发生了两次5.5级以上地震,地震周围地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 等均出现了先上升后下降的变化^[85]。

上述研究表明,断裂带附近土壤气体和温泉气体的浓度、通量和同位素比值等,以及温泉水、井水和地下水的水化学离子、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值与区域内的地震活动密切相关,在地震前后常出现明显的异常变化^[42,83,85]。因此,深入开展地震流体地球化学特征与地震活动的关系研究,对于地震异常识别、地震预测,以及地震流体的孕震机理研究等都有重要的科学意义和实践价值。

2.3 我国地震地球化学异常特征

根据1966~2012年的《中国震例》^[87-91], 本文统计发现了170个存在流体异常的震例, 其中, 出现地球化学异常的震例为147个, 占比高达86.5%。这些震例共涉及不同测项异常699个, 其中水(气)氦、水(气)汞等气体

测项较离子组分、同位素等测项取得更多震例, 异常总数是后者的3倍(表2)。

由于我国不同地区应力应变状态存在差异, 地球化学异常特征在数量、类型、时空特征等方面也存在地区差异^[92]。总体来看, 南北地震带出现流体地球化学

表 2 基于中国震例(1966~2012年)的全国地球化学异常统计^{a)}

Table 2 Statistics on geochemistry anomalies based on earthquake cases in China (1966–2012)

区域	全国	青藏高原	华北、东北地区	南北地震带	新疆地区	华东地区	华南地区	
气体地球 化学测项	水(气)氦	400	82	70	216	13	10	9
	水(气)汞	69	3	7	55	3	1	0
	H ₂	4	0	0	0	3	0	1
	CO ₂	36	0	9	24	3	0	0
	其他气体测项	24	0	1	7	14	0	2
地下水地球 化学测项	Ca ²⁺	26	0	1	10	1	4	10
	F ⁻	18	0	1	16	0	0	1
	Cl ⁻	12	0	6	0	1	3	2
	HCO ₃ ⁻	21	0	1	18	0	0	2
	流量	24	3	1	10	7	2	1
	其他水化测项	65	3	7	42	7	0	6
气体地球 化学异常	异常数	533	85	87	302	36	11	12
	占比(%)	76.3	93.4	83.7	75.9	69.2	55.0	35.3
	$\Delta < 100$ km	25.5	14.1	36.8	24.8	38.9	18.2	8.3
	$100 \text{ km} \leq \Delta < 200$ km	33.0	32.9	39.1	30.5	33.3	54.5	33.3
	$200 \text{ km} \leq \Delta < 300$ km	21.8	21.2	17.2	22.2	19.4	18.2	58.3
	$\Delta \geq 300$ km	19.7	31.8	6.9	22.5	8.3	9.1	0
地下水地球 化学异常	异常数	166	6	17	96	16	9	22
	占比(%)	23.7	6.6	16.3	24.1	30.8	45.0	64.7
	$\Delta < 100$ km	38.6	50.0	41.2	46.9	31.3	11.1	13.6
	$100 \text{ km} \leq \Delta < 200$ km	25.3	0	29.4	18.8	31.3	22.2	54.5
	$200 \text{ km} \leq \Delta < 300$ km	24.7	0	17.6	19.8	37.5	66.7	31.8
	$\Delta \geq 300$ km	11.4	50.0	11.8	14.6	0	0	0
地球化学 异常统计	异常数	699	91	104	398	52	20	34
	占比(%)	100.0	13.0	14.9	56.9	7.4	2.9	4.9
	$\Delta < 100$ km	28.6	16.5	37.5	30.2	36.5	15.0	11.8
	$100 \text{ km} \leq \Delta < 200$ km	31.2	30.8	37.5	27.6	32.7	40.0	47.1
	$200 \text{ km} \leq \Delta < 300$ km	22.5	19.8	17.3	21.6	25.0	40.0	41.2
	$\Delta \geq 300$ km	17.7	33.0	7.7	20.6	5.8	5.0	0

a) Δ 为震中距

异常的概率较大, 占全国地球化学异常总数一半以上(56.9%), 其次是华北、东北地区、青藏高原和新疆地区, 华南和华东地区的异常占比较少. 在异常类型方面, 华南地区的异常类型以地下水地球化学异常为主, 其余地区均以气体地球化学异常为主. 从异常与震中距关系来看, 存在流体地球化学异常震例的震中距(Δ)多集中于300 km范围内, 但也存在 $\Delta \geq 300$ km的震例, 特别是在南北地震带和青藏高原地区. 相比而言, $\Delta < 100$ km震例的地下水地球化学异常数量多于气体地球化学异常数量, 但在少数 $\Delta \geq 300$ km的震例中, 气体地球化学异常占比明显高于地下水地球化学异常, 表明气体具有更强的迁移能力.

此外, 从异常与震例数量的关系来看, 南北地震带和华北、东北地区的单震例异常数(异常总数/震例数量)相对较高. 从震级与单震例异常数来看, 统计显示, $5.0 \leq M < 6.0$ 和 $6.0 \leq M < 7.0$ 级地震的单震例异常数相当, 而当 $M \geq 7$ 时, 单震例异常数大幅增加(表3), 说明当地震达到一定震级后, 地球化学异常数量会急剧上升, 因此, 多异常同时出现, 是大地震前兆的基本特征, 这可为大震研判提供一定依据.

3 地震流体地球化学在地震预测中的应用

地震孕育-发生过程中, 伴随着区域应力场的改变, 断裂带及其周边区域的流体地球化学场也会随之改

表3 基于中国震例(1966~2012年)的全国地球化学异常震级特征统计

Table 3 Statistics on the magnitude characteristics of geochemistry anomalies based on earthquake cases in China (1966–2012)

区域		气体地球化学异常			地下水地球化学异常			地球化学异常统计			
		$\geq M7.0$	$6.0 \leq M < 7.0$	$5.0 \leq M < 6.0$	$\geq M7.0$	$6.0 \leq M < 7.0$	$5.0 \leq M < 6.0$	$\geq M7.0$	$6.0 \leq M < 7.0$	$5.0 \leq M < 6.0$	统计
全国	震例数	14	35	87	8	12	34	14	37	96	147
	异常数	129	137	244	39	52	98	168	189	342	699
	单震例异常数	9	4	3	5	4	3	12	5	4	7
青藏高原	震例数	2	10	18	1	1	2	2	11	19	32
	异常数	16	29	40	1	2	3	17	31	43	91
	单震例异常数	8	3	2	1	2	2	9	3	2	5
华北、东北地区	震例数	3	5	10	2	1	2	3	5	10	18
	异常数	35	28	25	9	2	6	44	30	31	105
	单震例异常数	12	6	3	5	2	3	15	6	3	8
南北地震带	震例数	8	15	41	4	7	16	8	16	44	68
	异常数	76	71	143	23	33	52	99	104	195	398
	单震例异常数	10	5	3	6	5	3	12	7	4	8
新疆地区	震例数	0	3	11	0	1	10	0	3	15	18
	异常数	0	4	24	0	7	17	0	11	41	52
	单震例异常数	0	1	2	0	7	2	0	4	3	2
华东地区	震例数	0	1	3	0	1	1	0	1	3	4
	异常数	0	4	6	0	6	3	0	10	9	19
	单震例异常数	0	4	2	0	6	3	0	10	3	4
华南地区	震例数	1	1	4	1	1	3	1	1	5	7
	异常数	2	1	6	6	2	17	8	3	23	34
	单震例异常数	2	1	2	6	2	6	8	3	5	5

变^[29,31,93],造成流体中元素和同位素的改变,形成地震地球化学异常.因此,在活动断裂带或地震活跃区域开展流体监测,有效识别监测数据异常,综合分析异常成因,是利用流体地球化学进行地震预测的前提.近年来,随着观测数据的积累,数据处理方法的不断开发,异常震例的积累总结,地震流体地球化学方法在地震预测中得以广泛运用,并取得显著进展.

3.1 数据分析与异常判定

在分析地震流体地球化学观测资料时,分析预报人员通过不断地探索资料处理和分析预报方法,如平滑滤波法、残差法、差分法、响应比法、变差法等,以排除干扰,提取异常信息,进行地震预测.对于俄罗斯南部堪察加半岛(强震活跃区)的5口观测深井的水离子观测数据,在平滑滤波去掉由于观测错误引起的高频波动后,对过去10年发生在井孔周围250 km范围内5个 $M>6.5$ 地震应用3倍均方差,提取出了3个震前异常变化^[94].Janja等人^[95]利用2倍均方差及梯度法分析地下水Rn浓度数据,结果显示,2004年11月24日,意大利东北部Cazzaso地区5.1级地震前3周出现明显的Rn浓度异常.Torkar等人^[96]以环境参量为输入,土壤气Rn含量为输出,利用反向传播算法训练人工神经网络模型,区分出环境和地震活动导致的土壤气Rn异常.结果表明,相比于其他数据挖掘方法,神经网络模型的预测能力较好,在13例地震事件中成功预测了10例,且预测性能在强震条件下有所提高^[96].应用变点分析及检测算法模型,Soldati等人^[6]对意大利中部地区Rn持续监测网中两个台站2012~2016年的时间序列数据进行了分析.结果显示,变点分析及检测算法能够提高Rn异常与地震活动的相关性,数据结果可成为2016年一次6.5级地震事件的预测依据.

为准确把握流体组分的异常变化,提高其在地震预测研究中的应用,诸多学者引入或开发了多种数据处理算法.晏锐等人^[97]基于岩石破裂实验结果并结合临界慢化理论,在分析临界慢化现象可能导致的自相关系数和方差增大现象的基础上,将其应用于水Rn观测资料的数据处理中,并结合汶川8.0级地震前全国模拟水Rn观测资料的计算结果讨论了可能存在的临界慢化现象,其结果表明,汶川8.0级地震前,不同台站的水Rn浓度均存在明显的临界慢化现象.Zhao等人^[98]提出采用形变时空演化模型进行地震预测,认为可作为地震前兆的流体地球化学信息在地表的反应会有一定的

分布特征,并具不同的权重,因此应对地球化学信息按一定权重处理后再用于地震预测.在伊朗克尔曼省地区,利用Rn连续监测网,针对特定目标区域,研究人员开发了确定地震位置及震级范围的算法.结果表明,预报精度与监测站数量成正相关,且该算法也适用于其他气体地球化学组分,可以为特定区域内的地震预测提供依据^[99].

3.2 地震预测应用

经验性地震预测方法可概括为:长、中、短、临相结合,场源兼顾,以场求源,实施多路探索,走综合分析的道路^[100].2014年8月3日鲁甸6.5级地震发生于中国地震局根据多学科手段确定的年度6~7级地震危险区内,持续的流体监测显示,在震前6个月左右,川滇交界东部和滇西地区开始出现突破长、中期背景趋势的短期趋势异常,包括水化学离子(F^- 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 等)、水汞、断层土壤气 CO_2 等,表现出强震孕育由中期向短期过渡的特点.在震前1个月左右,开始出现如四川宁南葫芦口断层气 CO_2 、云南巧家 Ca^{2+} 快速升高等临震异常,显示发震形式愈加趋紧^[101].此外,为提高流体地球化学方法在前兆识别、异常核实、震情跟踪等方面的有效应用,国内外学者基于实践经验和统计结果不断总结相关地震的预测方法.李宣璐^[102]统计分析了1976年唐山地震前地下水Rn的中期异常,提出了地下水Rn前兆异常的“扩散-收缩模型”,可为预测强震震中位置及发震时间提供判据.王基华等人^[103]基于长期观测发现,怀来后郝窑断裂带土壤气 CO_2 浓度对6级以上地震的映震距离可达500 km,且震前异常时间、幅度与发震震级的相关性较好,而发震时间往往在异常转折下降过程中,其据此对1998年1月10日张北-尚义地震进行了预测.嘉峪关断裂带土壤气Rn浓度数据与1992年以来祁连山中西段中强地震事件的对应关系分析显示,当测值超过正常值30 Bq/L左右时,台站300 km范围内将发生6.0级左右地震,基于此规律,相关人员预报了2003~2004年间3次地震事件^[104].臧思聪等人^[105]在震例统计的基础上总结了震前气体地球化学遥感数据异常特征,并据遥感参数特征和发震时间序列建立了四川地震前兆识别模型与地震震级预报模型,经测试,地震前兆识别率为79%,震级预报均方差为1.4314.车用太等人^[106]根据过往震例统计,总结了 H_2 异常出现时间与发震时间,异常幅度、震中距与震级大小的经验公式.杜建国等人^[3]研究发现,大部分地下水

化异常可以感应出300 km以内的大地震,甚至可以大致预测震级,且大震前地下流体异常有从外围向震中区迁移的时空变化现象. Hartmann和Levy^[107]基于229个与地震相关的水化学异常统计分析,总结出了地球化学异常信息(异常震前出现时间、异常持续时间、震中距)与地震三要素的经验公式,为地震预测提供定量化判据.

长期监测数据显示,一些地震流体连续监测网内不同站点往往对同一地震响应不一,存在各自的地震敏感区,而各站地震敏感区交汇部位通常发生震级较大的地震事件^[10,45,92].因而,如何圈定地震敏感区是各监测台站亟须解决的问题.基于川滇地区6个流体监测站10年的地下水溶解氡连续数据分析,Zhao等人^[92]计算了各台站数据的年波动变化的赫斯特指数,并根据各监测站捕获的地震事件,圈定了流体监测站的地震响应区(图4).此外,地震预测研究所在川滇地区拟运用“动态圆分析法”(图5),开展地震尝试性预测.该

方法拟通过科学布设台阵(沿断裂、等间距),结合气体地球化学异常响应地震的震中距与震级公式 $D=10^{0.43M}$ ^[108],利用辅助圆,判定研究区可能发生地震的区域和震级.将异常点位的分布特征归纳为单点异常(图5(a))和多点异常(图5(b)),并以此圈定潜在的地震危险区域.监测台站越多,可以判定的地震震级和区域更大、更精确.

综上所述,流体组分Rn、CO₂和H₂因其异常现象与地震活动间的强相关性,可以被遴选为地震流体地球化学预测的优选指标.地震流体地球化学方法预测地震具有时间优势,除了长、中、短期异常外,临震异常更为明显,历史上预测成功或有一定程度预测的地震案例,流体地球化学异常皆为重要参考指标.我国地震流体地球化学观测网分布齐全,目前已累积了数十年观测数据.2007年以来,中国地震局地震预测研究所针对中国大陆主要活动断裂带,开展了野外流体地球化学流动观测工作,建立了全国重点地震危险区(南北

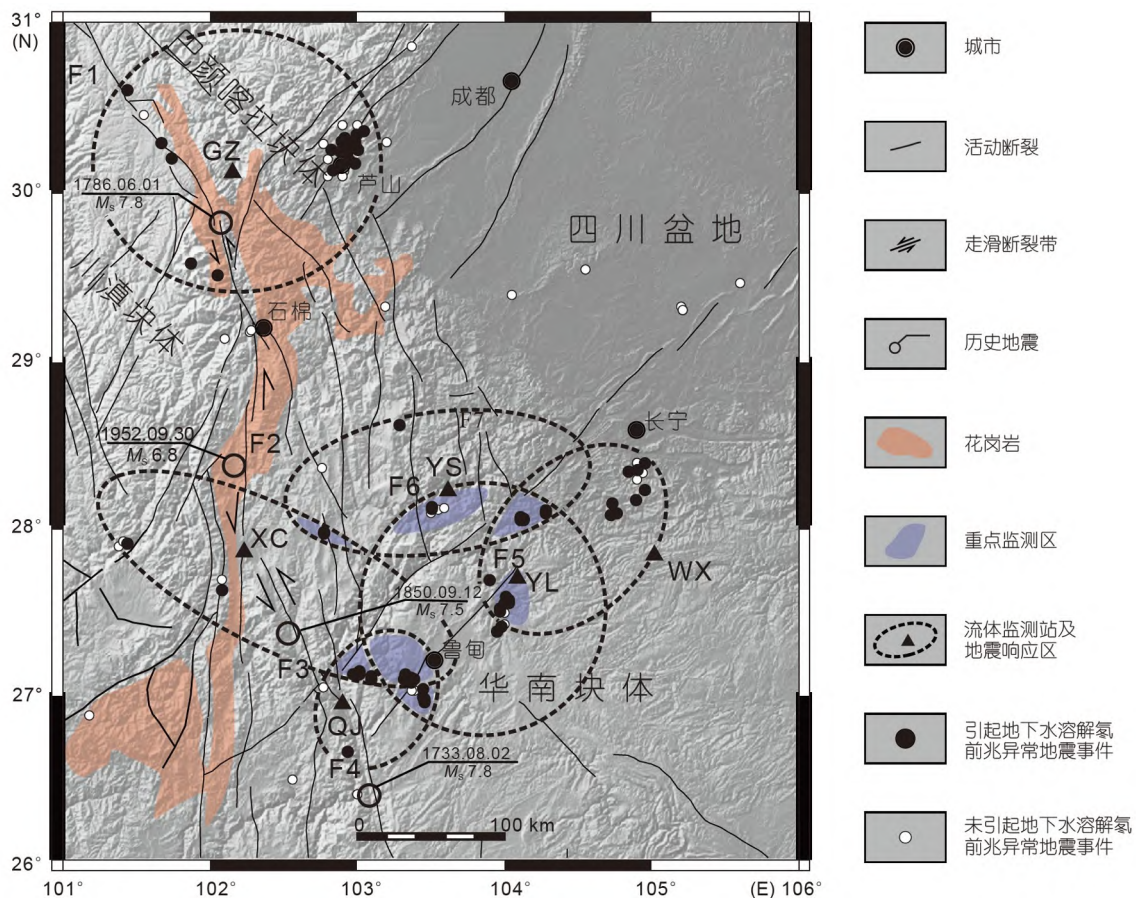


图4 川滇地区水氡监测站地震响应区
Figure 4 Earthquake detectable zones of each dissolved radon station in the Sichuan and Yunnan

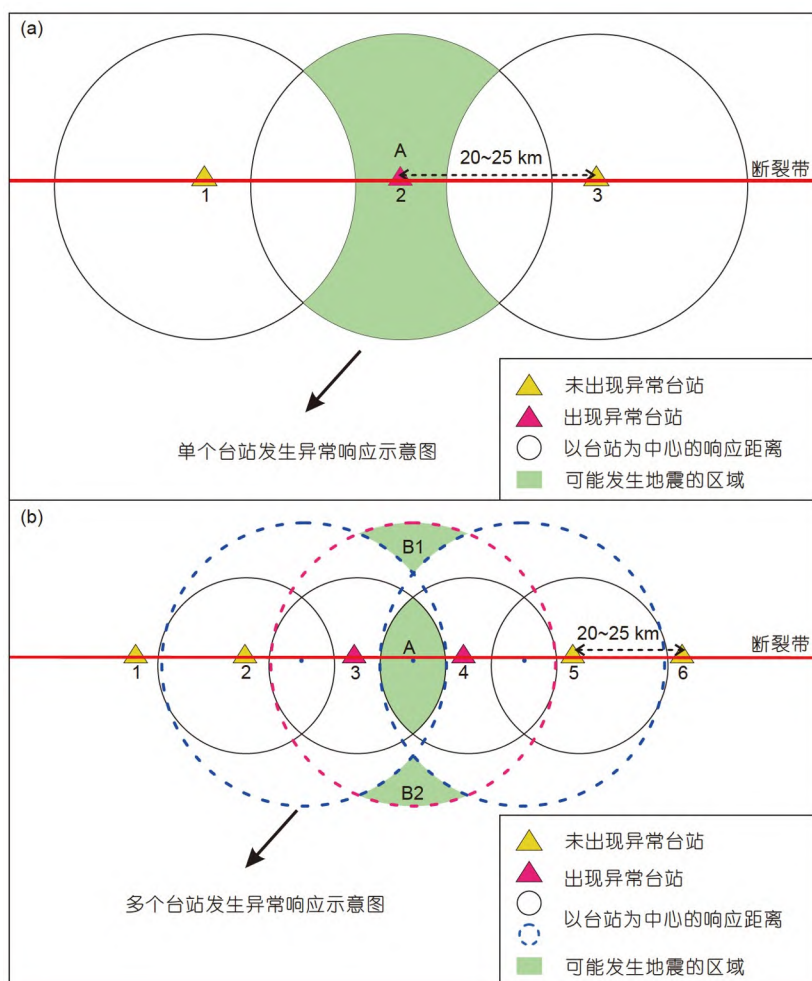


图 5 地震异常响应距离和震级关系判定的“动态圆法”示意图
 Figure 5 The “circle method” diagram for the relationship between earthquake anomaly response distance and magnitude

地震带、藏南、天山构造带、郯庐断裂带、张渤地震带、环鄂尔多斯地震带等)的流体地球化学背景场, 分析研究了流体地球化学时空变化与区域构造活动之间的关系, 并在全国建立了近百个流体地球化学固定观测井和连续测站, 为中国大陆地震危险区的地震异常判识和震情研判提供了观测与研究依据。

基于定量化学手段或经验性总结的地震流体地球化学异常分析, 能在一定程度上揭示地震活动引起的流体组分前兆特征, 并在此基础上尝试预测地震。然而, 地震孕育发生的空间尺度较大^[109], 各类预测方法多建立在现象对应和经验统计的基础之上, 缺乏地震流体地球化学异常成因机理的理论解释, 观察到的异常与地震关系的唯一性难以得到确认^[110], 导致预测方法的运用尚存在一定的局限性。基于此, 应该对地震孕育和发生过程中流体地球化学异常现象的成因机理开展更

为深入的系统研究。

4 新技术手段在地震流体地球化学中的运用

21世纪以来, 随着新观测技术和地球化学理论研究的持续进步, 流体地球化学在地震研究中的应用也取得了诸多进展。

近年来, 随着同位素分析技术的迅猛发展, 越来越多的同位素技术开始应用于地下流体的运移、成因机理以及与地震相关的研究中。⁴⁰Ar/³⁶Ar比值可作为研究大规模地壳流体运移的有效示踪方法^[111]; 利用¹⁰B/¹¹B与⁶Li/⁷Li值可研究地下流体与海水的相互关系, 一些沿海的地震地下流体监测站可利用该方法进行地下流体异常和地震前兆的研究, 判定监测站地下水是否受海水的影响^[112]。日本Ontake火山区水样的Li和Sr同位素特征表明, 区域地震发生前地下流体的异常主要

源自下地壳^[113]。在多条活动断裂带内,古地震通常可产生多期地裂缝,利用¹⁰Be测年方法可确定不同时期地裂缝内沉积物的年龄,进而可确定地震活动周期。Schuessler等人^[114]发现,Wettinquelle泉水中的Fe同位素平均值低于花岗岩,认为地震引起的流体-岩石相互作用和生物地球化学过程的变化控制Fe同位素的变化,因此Fe同位素有望成为该区地震活动监测的潜在手段。地下水中放射性同位素(³H、¹⁴C等)的定年,推动了地震地下水水位异常和地球化学异常的判定。研究显示,年轻及古老的地下水均难以充分反映地壳内部地球化学环境的变化,而年龄适中的地下水中一些化学组分易于表现异常,从而有利于地震前兆的监测^[115]。

随着流体地球化学在地震观测领域中的应用,观测方法也取得了一定的进步。如,台湾地区已建立了多个在线气体监测和地下水取样的自动系统,配备了四极杆质谱仪(quadrupole mass spectrometer, QMS)和Rn探测器。此外,还安装了注射泵装置,用于氦的连续采样。经过几个月的观测和分析,证实了利用该系统进行长期地球化学连续观测和异常捕获的可行性^[116]。中国地震局地震预测研究所在唐山地区建立了7个近断层、具有较高Rn和CO₂浓度、且远离人为污染的断裂带气体地球化学监测站,气体收集采用非主动富集模式,以确保地下气体自然运移条件不被破坏,集气装置配备有6管路的进出气口,以确保井内气体可循环以及土壤气体可采集^[69]。地震前后释放的含碳气体在大气中会产生局部温室效应,使孕震区温度升高,从而在卫星红外遥感图像上呈热红外异常^[117]。基于该原理,近年来国内外学者广泛利用卫星高光谱技术开展CO₂、CH₄、CO等气体观测,试图探索它们与区域构造活动或地震活动之间的关系^[56,118]。总之,越来越多的新技术和新手段应用到地震研究中,使得相关研究成果不断的积累与创新,进而促进地震流体地球化学成因机理与监测方法的不断进步。

5 发展趋势与展望

流体是地壳内部的活跃组分,其元素和同位素组成、排放强度与地下应力、温度等都与地质背景条件

的变化、物质来源等密切相关,是揭示构造和地震活动过程的重要研究对象。流体地球化学是研究地震孕育和发生机理的重要途径,也是重要的地震前兆现象。地震预测是人类长期追求的科技目标,地震前地下流体地球化学变化可以作为地震前兆,应在场地观测的空间上密集、时间上长期、频率上连续,以及多参数指标和高精度分析等的基础上,结合地球物理手段不断进行综合判识和研究评估。目前,随着研究基础的不断积累和新的地球化学手段的不断进步,地震地球化学的前兆研究正在引起全球范围研究者的关注。未来一段时期,随着中国地震科学实验场等大型地震科技活动项目的开展,地震地球化学将不断取得新的发展,并在地震成因研究和预测方法建立中发挥越来越重要的作用。具体包括以下四方面。

(1) 新技术新手段的运用。这将促进地震流体地球化学观测和研究的飞速进步。如卫星高光谱、无人机技术、大型质谱和光谱设备的研发,使得对大型断裂带和构造带实现连续高分辨率观测,新的元素和同位素手段得以运用。

(2) 多参数低成本观测设备的研制和集成。如多物理参数和化学参数观测设备的研制,在断裂带和地震带的密集布设,将使得地球化学场动态演化监测得以实现,构建类似气象观测的“地下气体地球化学场动态云图”,将大幅推动地球化学地震监测方法的建立。

(3) 人工智能等技术在地球流体地球化学领域的运用。从传统的流体地球化学地震观测曲线中获得地震前兆信息往往需要大量人工和经验,我国和其他地震多发国家积累了大量观测数据,人工智能手段的运用将大幅度推动这一工作的开展,结合同位素示踪等机理研究,将促进地震预测方法的建立。

(4) 大型实验模拟工作的开展。地震是地下物质运移、条件改变的过程,通过大型高压实验模拟装置、计算模拟装置等开展地下应力积累、介质破裂、地震成核过程的原位模拟,解释地震过程中流体地球化学成因机理并得出规律性认识,将在地震流体地球化学成因和演化机理认识方面取得突破性进展,也是建立地震预测方法的重要基础。

参考文献

- 1 Bi S W. A universal theory of system science for fluids in the Earth (in Chinese). *Earth Sci Front*, 1996, 3: 2-9 [毕思文. 地球内部流体系统科学统一理论. *地学前缘*, 1996, 3: 2-9]

- 2 Lu H Z, Fan H R, Ni P, et al. Fluid Inclusions (in Chinese). Beijing: Science Press, 2004. 1–274 [卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体. 北京: 科学出版社, 2004. 1–274]
- 3 Du J G, Li Y, Cui Y J, et al. Seismic Fluid Geochemistry (in Chinese). Beijing: Seismol Press, 2018. 1–272 [杜建国, 李营, 崔月菊, 等. 地震流体地球化学. 北京: 地震出版社, 2018. 1–272]
- 4 Skordas E S, Sarlis N V. On the anomalous changes of seismicity and geomagnetic field prior to the 2011 9.0 Tohoku earthquake. *J Asian Earth Sci*, 2017, 80: 161–164
- 5 Horiguchi K, Shimo Y, Matsuda J. The $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in hot spring gases after the Iwate-Miyagi Nairiku earthquake in 2008. *Geochim Cosmochim Acta*, 2009, 42: E1–E4
- 6 Soldati G, Cannelli V, Piersanti A. Monitoring soil radon during the 2016–2017 central Italy sequence in light of seismicity. *Sci Rep*, 2020, 10: 1–3
- 7 Zheng G, Xu S, Liang S, et al. Gas emission from the Qingzhu River after the 2008 Wenchuan Earthquake, Southwest China. *Chem Geol*, 2013, 339: 187–193
- 8 Fu C C, Yang T F, Tsai M C, et al. Exploring the relationship between soil degassing and seismic activity by continuous radon monitoring in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan. *Chem Geol*, 2016, 469: 163–175
- 9 Chen Z, Li Y, Liu Z, et al. Radon emission from soil gases in the active fault zones in the Capital of China and its environmental effects. *Sci Rep*, 2018, 8: 16772
- 10 Walia V, Yang T F, Lin S J, et al. Temporal variation of soil gas compositions for earthquake surveillance in Taiwan. *Radiat Meas*, 2013, 50: 154–159
- 11 Zheng G D, Guo Z F, Wang Y P, et al. New advances in gas geochemistry—In memory of Professor David R. Hilton, renowned expert in gas geochemistry (in Chinese). *Bull Miner Petrol Geochem*, 2018, 37: IV–VII [郑国东, 郭正府, 王云鹏, 等. 气体地球化学新进展——纪念著名气体地球化学专家David R. Hilton教授. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37: IV–VII]
- 12 Wakita H, Nakamura Y, Kita I, et al. Hydrogen release: New indicator of fault activity. *Science*, 1980, 210: 188–190
- 13 King C Y, Zhang W, Zhang Z. Earthquake-induced groundwater and gas changes. *Pure Appl Geophys*, 2006, 163: 633–645
- 14 Tamburello G, Pondrelli S, Chiodini G, et al. Global-scale control of extensional tectonics on CO_2 earth degassing. *Nat Commun*, 2018, 9: 4608
- 15 Sato M, Sutton A J, McGee K A, et al. Monitoring of hydrogen along the San Andreas and Calaveras Faults in central California in 1980–1984. *J Geophys Res*, 1986, 91: 12315–12326
- 16 McCarthy H, McGuire E. Soil gas studies along the Carlin trend, Eureka and Elko counties, Nevada. In: Tosdal R M, ed. Contributions to the Gold Metallogeny of Northern Nevada. Menlo Park: US Department of the Interior, US Geological Survey, 1998. 243–250
- 17 Browne P R L, Lawless J V. Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere. *Earth-Sci Rev*, 2001, 52: 299–331
- 18 Rogozhin E A, Gorbatikov A V, Larin N V, et al. Deep structure of the Moscow Aulacogene in the western part of Moscow. *Izv Atmos Ocean Phys*, 2010, 46: 973–981
- 19 Fu C C, Yang T F, Chen C H, et al. Spatial and temporal anomalies of soil gas in northern Taiwan and its tectonic and seismic implications. *J Asian Earth Sci*, 2017, 149: 64–77
- 20 Guo Z, Wilson M, Dingwell D B, et al. India-Asia collision as a driver of atmospheric CO_2 in the Cenozoic. *Nat Commun*, 2021, 12: 3891
- 21 Etiope G. Natural Gas Seepage: The Earth's Hydrocarbon Degassing. New York: Springer, 2015. 199
- 22 Sano Y, Fischer T P. The analysis and interpretation of noble gases in modern hydrothermal systems. In: Burnard P, ed. The Noble Gases as Geochemical Tracers (Advances in Isotope Geochemistry). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 249–318
- 23 Ohno M, Utsugi M, Mori T, et al. Temporal variation in the chemical composition (HCl/SO_2) of volcanic gas associated with the volcanic activity of Aso Volcano, Japan. *Earth Planets Space*, 2013, 65: 1–4
- 24 Chao H C, You C F, Liu H C, et al. The origin and migration of mud volcano fluids in Taiwan: Evidence from hydrogen, oxygen, and strontium isotopic compositions. *Geochim Cosmochim Acta*, 2013, 114: 29–51
- 25 Amponsah P, Banoeng-Yakubo B, Andam A, et al. Soil radon concentration along fault systems in parts of south eastern Ghana. *J Afr Earth Sci*, 2008, 51: 39–48
- 26 Chen Z, Li Y, Liu Z, et al. CH_4 and CO_2 emissions from mud volcanoes on the southern margin of the Junggar Basin, NW China: Origin, output, and relation to regional tectonics. *J Geophys Res Solid Earth*, 2019, 124: 5030–5044
- 27 Sun R B, Du J G. The hydrogeochemical background of the Wudalianchi volcanic area (in Chinese). *Bull Miner Petrol Geochem*, 1998, 17: 150–155 [孙如波, 杜建国. 五大连池火山区水文地球化学背景. 矿物岩石地球化学通报, 1998, 17: 150–155]
- 28 Wang X L, Yang M Y, Kong X R, et al. Comparative study on cross-fault leveling and geochemical characteristics of soil gas of Chaoyang-Beipiao fault in Liaoning Province (in Chinese). *J Geod Geodyn*, 2021, 41: 600–605 [王喜龙, 杨梦尧, 孔祥瑞, 等. 辽宁朝阳-北票断裂跨断层水准与断层土壤气地球化学特征对比分析. 大地测量与地球动力学, 2021, 41: 600–605]
- 29 Li Y, Du J, Wang X, et al. Spatial variations of soil gas geochemistry in the Tangshan area of northern China. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2013, 24:

323–332

- 30 Han X K. Soil gas geochemistry across the active fault zones in the capital area of China (in Chinese). Master Thesis. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 2014 [韩晓昆. 首都圈地震重点监测区土壤气体地球化学. 硕士学位论文. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2014]
- 31 Li Y, Du J, Wang F, et al. Geochemical characteristics of soil gas in the Yanhuai basin, northern China. *Earthq Sci*, 2009, 22: 93–100
- 32 Li J, Chen Z, Lu L N, et al. Degassing of CO₂, Rn and Hg from the Xiadian active fault and their environmental significance (in Chinese). *Bull Miner Petrol Geochem*, 2018, 37: 629–638 [李静, 陈志, 陆丽娜, 等. 夏垫活动断裂CO₂、Rn、Hg脱气对环境的影响. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37: 629–638]
- 33 Zhang G Y. Geochemistry of soil gas from the active fault zones in the northern part of Shanxi seismic zone (in Chinese). Master Thesis. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 2015 [张冠亚. 山西地震带北段断裂带土壤气体地球化学特征. 硕士学位论文. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2015]
- 34 Zhao J M, Li Y, Chen Z, et al. Correlation between gas geochemical emission and fault activity of the Yuxian-Guangling and the Kouquan faults (in Chinese). *Seismol Geol*, 2018, 40: 1–15 [赵建明, 李营, 陈志, 等. 蔚县-广灵断裂和口泉断裂气体排放和断裂活动性关系. 地震地质, 2018, 40: 1–15]
- 35 Liu Z F. Soil gas geochemistry characteristics in the western margin of the Ordos block China (in Chinese). Master Thesis. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 2020 [刘兆飞. 鄂尔多斯西缘断裂带土壤气体地球化学特征. 硕士学位论文. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2020]
- 36 Zhou X C, Guo W S, Du J G, et al. The geochemical characteristics of radon and mercury in the soil gas of buried faults in the Hohhot district (in Chinese). *Earthquake*, 2007, 27: 70–76 [周晓成, 郭文生, 杜建国, 等. 呼和浩特地区隐伏断层土壤气氡、汞地球化学特征. 地震, 2007, 27: 70–76]
- 37 Li C H, Zhang H, Su H J, et al. Study on correlation between geochemical features of deep gas and fault deformation distribution in northern margin fault zone of west Qinling (in Chinese). *China Earthq Eng J*, 2016, 38: 955–963 [李晨桦, 张慧, 苏鹤军, 等. 西秦岭北缘断裂带深部气体地球化学特征与断层形变空间分布相关性研究. 地震工程学报, 2016, 38: 955–963]
- 38 Zhang X J, Zhang H, Su H J, et al. Geochemical feature of radon and mercury across Liujiapu active fault (in Chinese). *Earthquake*, 2005, 25: 87–92 [张新基, 张慧, 苏鹤军, 等. 刘家堡活动断层土壤气氡、汞地球化学特征. 地震, 2005, 25: 87–92]
- 39 Zhang H, Zhang X J, Su H J, et al. The geochemical features of radon and mercury on Lanzhou Jinchengguan active fault (in Chinese). *Northwest Seismol J*, 2005, 27: 150–153 [张慧, 张新基, 苏鹤军, 等. 金城关活动断裂带土壤气氡、汞地球化学特征. 西北地震学报, 2005, 27: 150–153]
- 40 Liu Y M, Wang H L, Wang J Q, et al. Geochemical characteristics of soil gas (Rn, CO₂ and Hg) in the Shandong section of Tanlu fault zone (in Chinese). *Seismol Geomagn Obs Res*, 2016, 37: 63–69 [刘永梅, 王华林, 王纪强, 等. 郯庐断裂带山东段土壤气体地球化学特征. 地震地磁观测与研究, 2016, 37: 63–69]
- 41 He G Q, Zhang B A, Liao Y M, et al. Discussion of the trace gas distribution and the recent activity of Aerjin fault (in Chinese). *Northwest Seismol J*, 1989, 11: 16–20 [何跟巧, 张必敖, 廖元模, 等. 阿尔金断裂微量气体分布与断层现今活动性讨论. 西北地震学报, 1989, 11: 16–20]
- 42 Zhou X, Du J, Chen Z, et al. Geochemistry of soil gas in the seismic fault zone produced by the Wenchuan Ms 8.0 earthquake, southwestern China. *Geochem Trans*, 2010, 11: 5
- 43 Yang Y, Li Y, Guan Z, et al. Correlations between the radon concentrations in soil gas and the activity of the Anninghe and the Zemuhe faults in Sichuan, southwestern of China. *Appl Geochem*, 2018, 89: 23–33
- 44 Yang Y, Li Y, Li Y G, et al. Present-day activity of the Anninghe fault and Zemuhe fault, southeastern Tibetan Plateau, derived from soil gas CO₂ emissions and locking degree. *Earth Space Sci*, 2021, 8: 1–25
- 45 Zhao Z S, Zhang H, Su H J. The geochemical features of mercury and radon on Maqu active fault (in Chinese). *Northwest Seismol J*, 2011, 33: 376–379 [赵振桑, 张慧, 苏鹤军. 玛曲断裂带土壤气汞、氡地球化学特征. 西北地震学报, 2011, 33: 376–379]
- 46 Fu C, Walia V, Yang T, et al. Preseismic anomalies in soil-gas radon associated with 2016 M_{6.6} Meinong earthquake, southern Taiwan. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2017, 28: 778–798
- 47 Walia V, Lin S J, Fu C C, et al. Soil-gas monitoring: A tool for fault delineation studies along Hsinhua Fault (Tainan), southern Taiwan. *Appl Geochem*, 2010, 25: 602–607
- 48 Perrier F, Richon P, Byrdina S, et al. A direct evidence for high carbon dioxide and radon-222 discharge in Central Nepal. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 278: 198–207
- 49 Lombardi S, Voltattorni N. Rn, He and CO₂ soil gas geochemistry for the study of active and inactive faults. *Appl Geochem*, 2010, 25: 1206–1220
- 50 Ciotoli G, Etiope G, Guerra M, et al. The detection of concealed faults in the Ofanto Basin using the correlation between soil-gas fracture surveys. *Tectonophysics*, 1999, 301: 321–332
- 51 Ciotoli G, Lombardi S, Annunziatellis A. Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino Plain, central Italy. *J*

- Geophys Res, 2007, 112: B05407
- 52 Vaupotič J, Gregorič A, Kobal I, et al. Radon concentration in soil gas and radon exhalation rate at the Ravne Fault in NW Slovenia. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2010, 10: 895–899
- 53 Jaishi H P, Singh S, Tiwari R P, et al. Radon and thoron anomalies along Mat fault in Mizoram, India. *J Earth Syst Sci*, 2013, 122: 1507–1513
- 54 Padilla G D, Hernández P A, Padrón E, et al. Soil gas radon emissions and volcanic activity at El Hierro (Canary Islands): The 2011–2012 submarine eruption. *Geochem Geophys Geosyst*, 2013, 14: 432–447
- 55 Yang J, Li Y, Chen Z, et al. Geochemical characteristics of soil gas in the south-west and north-east segments of the Tangshan fault zone, northern China (in Chinese). *Earthquake*, 2019, 39: 61–70 [杨江, 李营, 陈志, 等. 唐山断裂带南西段和北东段土壤气Rn和CO₂浓度特征. *地震*, 2019, 39: 61–70]
- 56 Cui Y, Ouzounov D, Hatzopoulos N, et al. Satellite observation of CH₄ and CO anomalies associated with the Wenchuan Ms 8.0 and Lushan Ms 7.0 earthquakes in China. *Chem Geol*, 2017, 469: 185–191
- 57 Zhang M, Xu S, Zhou X, et al. Deciphering a mantle degassing transect related with India-Asia continental convergence from the perspective of volatile origin and outgassing. *Geochim Cosmochim Acta*, 2021, 310: 61–78
- 58 Zhang M, Guo Z, Xu S, et al. Linking deeply-sourced volatile emissions to plateau growth dynamics in southeastern Tibetan Plateau. *Nat Commun*, 2021, 12: 4157
- 59 Irwin W P, Barnes I. Tectonic relations of carbon dioxide discharges and earthquakes. *J Geophys Res*, 1980, 85: 3115–3121
- 60 Faulkner D R, Jackson C A L, Lunn R J, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *J Struct Geol*, 2010, 32: 1557–1575
- 61 Sun X, Yang P, Xiang Y, et al. Across-fault distributions of radon concentrations in soil gas for different tectonic environments. *Geosci J*, 2018, 22: 227–239
- 62 Giammanco S, Immè G, Mangano G, et al. Comparison between different methodologies for detecting radon in soil along an active fault: The case of the Pernicana fault system, Mt. Etna (Italy). *Appl Radiat Isot*, 2009, 67: 178–185
- 63 Chaudhuri H, Bari W, Iqbal N, et al. Long range gas-geochemical anomalies of a remote earthquake recorded simultaneously at distant monitoring stations in India. *Geochem J*, 2011, 45: 156
- 64 Woith H, Wang R, Maiwald U, et al. On the origin of geochemical anomalies in groundwaters induced by the Adana 1998 earthquake. *Chem Geol*, 2013, 339: 177–186
- 65 Yang Q Y, Zhang Y, Fu L G, et al. Coupling mechanism of stress variation and groundwater (water level, water temperature, hydrochemistry, soil gas, etc.) and its application in earthquake precursors research in Sichuan and Yunnan regions (in Chinese). *Prog Geophys*, 2020, 35: 2124–2133 [杨秋野, 张艳, 符力耘, 等. 应力变化与流体(水位、水温、水化学、土壤气等)变化的耦合机理及其在川滇地区地震前兆研究中的应用. *地球物理学进展*, 2020, 35: 2124–2133]
- 66 Zhou X, Yan Y, Fang W, et al. Short-term seismic precursor anomalies of hydrogen concentration in Luojishan hot spring bubbling gas, eastern Tibetan Plateau. *Front Earth Sci*, 2021, 8: 586279
- 67 Woith H. Radon earthquake precursor: A short review. *Eur Phys J Spec Top*, 2015, 224: 611–627
- 68 Zhou X, Wang W, Chen Z, et al. Hot spring gas geochemistry in western Sichuan Province, China after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2015, 26: 361–373
- 69 Chen Z, Li Y, Liu Z, et al. Evidence of multiple sources of soil gas in the Tangshan fault zone, North China. *Geofluids*, 2019, 3: 1–12
- 70 Chen Z, Li Y, Martinelli G, et al. Spatial and temporal variations of CO₂ emissions from the active fault zones in the capital area of China. *Appl Geochem*, 2020, 112: 1–10
- 71 Sahoo S K, Katlamudi M, Barman C, et al. Identification of earthquake precursors in soil radon-222 data of Kutch, Gujarat, India using empirical mode decomposition based Hilbert Huang Transform. *J Environ Radioact*, 2020, 222: 106353
- 72 Sciarra A, Cantucci B, Coltorti M. Learning from soil gas change and isotopic signatures during 2012 Emilia seismic sequence. *Sci Rep*, 2017, 7: 14187
- 73 Zhang L, Liu Y, Guo L, et al. Isotope geochemistry of mercury and its relation to earthquake in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1). *Tectonophysics*, 2014, 619–620: 79–85
- 74 di Luccio F, Ventura G, di Giovambattista R, et al. Normal faults and thrusts reactivated by deep fluids: The 6 April 2009 *M_w* 6.3 L'Aquila earthquake, central Italy. *J Geophys Res*, 2010, 115: B06315
- 75 Tareen A D K, Nadeem M S A, Kearfott K J, et al. Descriptive analysis and earthquake prediction using boxplot interpretation of soil radon time series data. *Appl Radiat Isot*, 2019, 154: 108861
- 76 Zhang B, Liu Y W, Fang Z, et al. Relationship between concentrations of hydrogen and mercury of No. 2 hole cores at the Wenchuan Earthquake Scientific Drilling and fault zone structure (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2018, 61: 1771–1781 [张彬, 刘耀炜, 方震, 等. 汶川地震科学钻探2号孔(WFSD-2)随钻泥浆氢和汞浓度与断裂构造关系. *地球物理学报*, 2018, 61: 1771–1781]

- 77 Chen Z, Zhou X, Du J, et al. Hydrochemical characteristics of hot spring waters in the Kangding district related to the Lushan $M_S = 7.0$ earthquake in Sichuan, China. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2015, 15: 1149–1156
- 78 Kong Q M, Wang G C, Shi Z M. Statistical analysis of pre-seismic anomalous characteristics of subsurface fluids in Yunnan region (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 2018, 40: 632–645 [孔庆敏, 王广才, 史浙明. 云南地区震前地下流体异常特征统计分析. 地震学报, 2018, 40: 632–645]
- 79 Du J, Cheng W, Zhang Y, et al. Helium and carbon isotopic compositions of thermal springs in the earthquake zone of Sichuan, Southwestern China. *J Asian Earth Sci*, 2006, 26: 533–539
- 80 Zhou X C, Wang W L, Li L W, et al. Geochemical features of hot spring gases in the Jinshajiang-Red River fault zone, Southeast Tibetan Plateau (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2020, 36: 2197–2214 [周晓成, 王万丽, 李立武, 等. 金沙江-红河断裂带温泉气体地球化学特征. 岩石学报, 2020, 36: 2197–2214]
- 81 Nishizawa S, Igarashi G, Sano Y, et al. Radon, Cl^- and SO_4^{2-} anomalies in hot spring water associated with the 1995 earthquake swarm off the east coast of the Izu Peninsula, Central Japan. *Appl Geochem*, 1998, 13: 89–94
- 82 Favara R, Grassa F, Inguaggiato S, et al. Hydrogeochemistry and stable isotopes of thermal springs: Earthquake-related chemical changes along Belice Fault (Western Sicily). *Appl Geochem*, 2002, 16: 1–17
- 83 Cox S C, Menzies C D, Sutherland R, et al. Changes in hot spring temperature and hydrogeology of the Alpine Fault hanging wall, New Zealand, induced by distal South Island earthquakes. *Geofluids*, 2015, 15: 216–239
- 84 Reddy D V, Nagabhushanam P. Groundwater electrical conductivity and soil radon gas monitoring for earthquake precursory studies in Koyna, India. *Appl Geochem*, 2011, 26: 731–737
- 85 Skelton A, Andr n M, Kristmannsd ttir H, et al. Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland. *Nat Geosci*, 2014, 7: 752–756
- 86 Zhao Y H, Bai J T, Li X F, et al. Correlation between hydrogen isotope in underground water near active fault and earthquakes (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2011, 27: 1909–1915 [赵永红, 白竣天, 李小凡, 等. 活动断裂带附近地下水中的氢同位素变化与地震关系的研究. 岩石学报, 2011, 27: 1909–1915]
- 87 Zhang Z C. Earthquake Cases in China (1966–1999) (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1988 [张肇诚. 中国震例(1966–1999). 北京: 地震出版社, 1988]
- 88 Chen Q F. Earthquake Cases in China (2000–2002) (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2008 [陈棋福. 中国震例(2000–2002). 北京: 地震出版社, 2008]
- 89 Jiang H K. Earthquake Cases in China (2003–2006) (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2014 [蒋海昆. 中国震例(2003–2006). 北京: 地震出版社, 2014]
- 90 Jiang H K. Earthquake Cases in China (2007–2010) (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2018 [蒋海昆. 中国震例(2007–2010). 北京: 地震出版社, 2018]
- 91 Jiang H K. Earthquake Cases in China (2011–2012) (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2018 [蒋海昆. 中国震例(2011–2012). 北京: 地震出版社, 2018]
- 92 Zhao Y X, Liu Z F, Li Y, et al. A case study of 10 years groundwater radon monitoring along the eastern margin of the Tibetan Plateau and in its adjacent regions: Implications for earthquake surveillance. *Appl Geochem*, 2021, 131: 1–11
- 93 King C Y. Gas geochemistry applied to earthquake prediction: An overview. *J Geophys Res*, 1986, 91: 12269–12281
- 94 Biagi P F, Ermioni A, Kingsley S P, et al. Groundwater ion content precursors of strong earthquakes in Kamchatka (Russia). *Pure Appl Geophys*, 2000, 157: 1359–1377
- 95 Janja V, Anna R, Marco S, et al. A radon anomaly in soil gas at Cazzaso, NE Italy, as a precursor of an $M_L=5.1$ earthquake. *Nukleonika*, 2010, 55: 507–511
- 96 Torkar D, Zmazek B, Vaupotič J, et al. Application of artificial neural networks in simulating radon levels in soil gas. *Chem Geol*, 2010, 270: 1–8
- 97 Yan R, Jiang C S, Zhang L P. Study on critical slowing down phenomenon of Radon concentrations in water before the Wenchuan $M_S 8.0$ earthquake (in Chinese). *J Geophys*, 2011, 54: 1817–1826 [晏锐, 蒋长胜, 张浪平. 汶川8.0级地震前水氡浓度的临界慢化现象研究. 地球物理学报, 2011, 54: 1817–1826]
- 98 Zhao Y H, Xiao Y J, Zhang Q, et al. Earthquake prediction VII: Geochemical method (in Chinese). *Prog Geophys*, 2018, 33: 1022–1028 [赵永红, 肖彦君, 张琼, 等. 地震预测方法VII: 水文地球化学方法. 地球物理学进展, 2018, 33: 1022–1028]
- 99 Hashemi S, Megarestani A, Namvaran M, et al. An analytical algorithm for designing radon monitoring network to predict the location and magnitude of earthquakes. *J Radioanal Nucl Chem*, 2013, 295: 2249–2262
- 100 Yue M S. Thoughts on the development strategy of earthquake prediction research (in Chinese). *Recent Dev World Seismol*, 2005, 5: 7–21 [岳明生. 地震预测研究发展战略几点思考. 国际地震动态, 2005, 5: 7–21]
- 101 Liu Y W, Ren H W, Zhang L, et al. Underground fluid anomalies and the precursor mechanisms of the Ludian $M_S 6.5$ earthquake (in Chinese). *Seismol Geol*, 2015, 37: 307–318 [刘耀炜, 任宏微, 张磊, 等. 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, 2015, 37: 307–

318]

- 102 Li X H. The diffusion and shrinkage of the anomalies in water and oxygen (in Chinese). *Earthquake*, 1981, 5: 41–43 [李宣瑚. 水氦异常的扩散收缩现象. *地震*, 1981, 5: 41–43]
- 103 Wang J H, Lin Y W, Gao S S. Monitoring of CO₂ in fault gas at Huailai and short term prediction of Zhangbei-Shangyi earthquake (in Chinese). *Seismol Geol*, 1998, 20: 113–116 [王基华, 林元武, 高升松. 怀来断层气CO₂监测及张北-尚义地震的短临预报. *地震地质*, 1998, 20: 113–116]
- 104 Cao X, Zhang Z B, Zhang C Y. Analysis on the anomalous characteristics of Jiayuguan gas radon to the strong earthquakes in western segment of Qilian Mountain (in Chinese). *Seismol Geomagn Obs Res*, 2008, 29: 50–53 [曹喜, 张占斌, 张彩艳. 嘉峪关断层气氡对祁连山西段中强地震的异常特征分析. *地震地磁观测与研究*, 2008, 29: 50–53]
- 105 Zang S C, Li Y Q, Cai Y W, et al. Characteristics of earthquake anomalies and earthquake prediction model based on atmospheric remote sensing (in Chinese). In: *The 4th National Statistical Modeling Competition for College Students*. 2015. 1117–1138 [臧思聪, 李言青, 蔡雅薇, 等. 基于大气遥感的地震异常特征规律和地震预报模型. 见: 2015年(第四届)全国大学生统计建模大赛. 2015. 1117–1138]
- 106 Che Y T, Liu Y W, He L. Hydrogen monitoring in fault zone soil gas—A new approach to short/immediate earthquake prediction (in Chinese). *Earthquake*, 2015, 35: 1–10 [车用太, 刘耀炜, 何镛. 断层带土壤中H₂观测——探索地震短临预报的新途径. *地震*, 2015, 35: 1–10]
- 107 Hartmann J, Levy J K. Hydrogeological and gasgeochemical earthquake precursors? A review for application. *Nat Hazards*, 2005, 34: 279–304
- 108 Dobrovolsky I P, Zubkov S I, Miachkin V I. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure Appl Geophys*, 1979, 117: 1025–1044
- 109 Liu J, Zhang G M. Discussion on “Are there earthquake precursors that can lead to useful predictions?” (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1988–1994 [刘杰, 张国民. “是否存在有助于预报的地震前兆”的讨论. *科学通报*, 2016, 61: 1988–1994]
- 110 Ma J. On “whether earthquake precursors help for prediction do exist” (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 409–414 [马瑾. 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起. *科学通报*, 2016, 61: 409–414]
- 111 Sarda P, Staudacher T, Allègre C J. ⁴⁰Ar/³⁶Ar in MORB glasses: Constraints on atmosphere and mantle evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 1985, 72: 357–375
- 112 Gregoire D C. Determination of boron isotope ratios in geological materials by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Anal Chem*, 1987, 59: 2479–2484
- 113 Nishio Y, Okamura K, Tanimizu M, et al. Lithium and strontium isotopic systematics of waters around Ontake volcano, Japan: Implications for deep-seated fluids and earthquake swarms. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 297: 567–576
- 114 Schuessler J A, Kämpf H, Koch U, et al. Earthquake impact on iron isotope signatures recorded in mineral spring water. *J Geophys Res Solid Earth*, 2016, 121: 8548–8568
- 115 Liu Y W, Ren H W, Wang B. Application prospect of environmental isotopes and tracing techniques for earthquake prediction (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2009, 16: 369–377 [刘耀炜, 任宏微, 王博. 环境同位素及其示踪技术在地震预测研究中的应用前景. *地学前缘*, 2009, 16: 369–377]
- 116 Fu C C, Lai C W, Yang T F, et al. An automatic system for continuous monitoring and sampling of groundwater geochemistry in earthquake-prone regions of SW Taiwan. *Front Earth Sci*, 2021, 9: 635913
- 117 Zhang Y S, Guo X, Zhong M J, et al. Wenchuan earthquake: Brightness temperature changes from satellite infrared information. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 1917–1924
- 118 Singh R P, Kumar S J, Zlotnicki J, et al. Satellite detection of carbon monoxide emission prior to the Gujarat earthquake of 26 January 2001. *Appl Geochem*, 2010, 25: 580–585

Summary for “流体地球化学进展及其在震预测研究中的应用”

Advances in seismic fluid geochemistry and its application in earthquake forecasting

Ying Li^{1*}, Zhi Chen¹, Le Hu¹, Shujuan Su², Chenhe Zheng³, Zhaofei Liu⁴, Chang Lu¹, Ying Zhao⁵, Jie Liu⁶, Hongyi He¹, Fengxia Sun¹, Chaowen Xu¹, Xiaocheng Zhou¹, Jianguo Du¹, Sheng Xu⁷ & Guodong Zheng⁸

¹ CEA Key Laboratory of Earthquake Prediction, Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China;

² Yantai Earthquake Monitoring Center Station, Shandong Earthquake Agency, Yantai 264000, China;

³ Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China;

⁴ School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

⁵ Jiangxi Earthquake Agency, Nanchang 330026, China;

⁶ Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, China;

⁷ Institute of Surface-Earth System Science, School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

⁸ Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

* Corresponding author, E-mail: liying@ief.ac.cn

Earthquakes are one of the most serious natural disasters of the world, with huge potential to cause serious injury and damage to humans and society. Earthquake forecasting, however, still remains a worldwide unsolved problem. The generation and occurrence of an earthquake—Accompanied by material migration, energy transmission and abrupt changes of underground conditions—Can result in the migration and evolution of geochemical elements and isotopes in natural fluids. Active fault zones are not only earthquake-prone areas but also deep fluid overflow channels. The geochemical characteristics of fluids in active faults act as good indicators for tectonic and seismic activities due to their high sensitivities to the changes of stress, temperature and permeability in the crust. The spatial and temporal variations of fluids in the active fault zones are closely related to the deep geological process and as well as the type, scale, and state of the active faults. On the contrary, the state change of an active fault can continue to affect the evolution and migration process of the deep fluids. The close relationship between fluid geochemistry and active faults makes fluid geochemistry not only an important role in earthquake forecasting but also an effective means to explain the changes of materials and conditions that take place during an earthquake. Before the occurrence of an earthquake, the stress and strain can lead to complex changes of chemical elements and isotopes in subsurface water, gas, soil and/or other media, that is, seismic fluid geochemistry anomalies. Therefore, in active fault zones or seismically active areas, monitoring the fluid geochemistry in these surface media and effectively identifying anomalies related to earthquakes have been identified as promising methods for earthquake forecasting. In recent years, seismic fluid geochemistry has been widely used to forecast earthquakes around the world due to its comparatively low costs and the advantages of its timeliness, simplicity, and convenience. Furthermore, with the accumulation of observation data, improved data processing methods and summaries of earthquake cases, more and more fluid geochemistry anomalies are being detected before the occurrence of earthquakes, particularly that of big earthquakes. As a result of the early detection of geochemistry anomalies, some earthquakes have even been successfully predicted. In addition, new analytical techniques play a more significant role in studies of the mechanism of earthquake precursors and seismic physical processes. However, most earthquake predictions are currently based on phenomenon correspondence and/or empirical statistics, and the lack of research on the genetic mechanism of seismic fluid geochemistry anomalies leads to difficulties in the further application of this method. As such, there remains significant room for improvement for the construction of a prediction model based on seismic fluid geochemistry. In this paper, the recent research progress of seismic fluid geochemistry in the field of earthquake forecasting is summarised and combined with our research results and insights to provide guidance for future works in earthquake forecasting methods.

earthquake, seismic fluids, fluid geochemistry anomalies, earthquake forecasting

doi: [10.1360/TB-2021-0955](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0955)