

赵子科, 陈春亮, 柯盛, 杨波. 2021. 汞异常与地震活动关系及预报效能研究进展. 地球与行星物理论评, 52(3): 341-347. doi: 10.16738/j.dqyxx.2020-021
Zhao Z K, Chen C L, Ke S, Yang B. 2021. Advances on the relationship between mercury anomaly and seismicity and earthquake prediction efficiency. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 52(3): 341-347. doi:10.16738/j.dqyxx.2020-021

汞异常与地震活动关系及预报效能研究进展

赵子科¹, 陈春亮¹, 柯盛¹, 杨波^{2*}

1 广东海洋大学分析测试中心, 湛江 524088

2 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264000

摘要: 汞主要来源于地球深部地幔岩石和岩浆, 具有溶解度小、蒸气压低、穿透能力强等特点. 地震前, 汞在高温和强压力梯度下穿过不同的介质到达地表, 导致汞震前异常. 汞的前兆异常特征通常被用作地震前预测的重要指标. 本文综合国内应用汞的地震观测案例, 得出以下结论: (1) 与气态汞相比, 水溶性汞具有收集方便、不易受传输介质干扰、前兆异常幅度大等特征, 易震前观测; (2) 水溶性汞观测异常结束到发震时间间隔较长, 而气态汞异常一般持续到地震发生; (3) 震前汞的异常幅度通常是本底值的数倍至几十倍, 这往往与震中距离、震级大小及地质构造有关; (4) 对于 5 级及以下地震, 水溶性汞异常范围通常在 200 km 以内, 5~6 级地震映震范围在 500 km 以内. 此外, 汞震前观测异常与孕震应力场作用下的地下流体活动有关, 汞的同位素分馏技术提供了一种新的手段来解决断裂带汞的来源以及汞与地壳深部流体活动的关系.

关键词: 地震; 水汞; 气汞; 汞同位素

doi: 10.16738/j.dqyxx.2020-021

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

Advances on the relationship between mercury anomaly and seismicity and earthquake prediction efficiency

Zhao Zike¹, Chen Chunliang¹, Ke Sheng¹, Yang Bo^{2*}

1 Analysis and Test Center, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China.

2 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China.

Abstract: Mercury is mainly from deep mantle rocks and magma in the Earth and has low solubility, low vapor pressure, and strong penetrating ability. Before earthquakes, mercury can pass through different media to reach the surface under high temperatures and large pressure gradients, causing pre-earthquake mercury anomalies. The precursory anomalies of mercury are usually used as an important indicator for earthquake prediction. In this paper, we comprehensively analyze the domestic literature which uses mercury for seismic observations. We obtain the following conclusions: (1) Compared to gaseous mercury, water-soluble mercury can be collected more conveniently, is less susceptible to interference from transmission media, and has larger precursor anomalies. Hence, it is a better indicator of pre-earthquake observations than the gaseous mercury. (2) There is a big interval between the end of water-soluble mercury anomaly and the start of earthquakes, while gaseous-mercury anomalies usually last until the earthquakes start. (3) The anomalous concentration of mercury before earthquakes is usually several to dozens of times of the background value. The concentration usually depends on the distance to the epicenter, earthquake magnitude, and geological structure. (4) For earthquakes with magnitude less than 5, the water-soluble mercury anomalies are usually found within a radius of 200 km around the epicenter, while for earthquakes with mag-

收稿日期: 2020-10-16; 录用日期: 2020-12-02

基金项目: 湛江市科学技术局资助项目 (2019B01009)

Supported by the Science and Technology Bureau of Zhanjiang of China (Grant No. 2019B01009)

第一作者: 赵子科 (1989-), 男, 实验师, 主要从事海洋环境中汞的研究. E-mail: 932377192@qq.com

*通讯作者: 杨波 (1990-), 男, 研究助理, 主要从事海洋生源要素的生物地球化学研究. E-mail: 1968236304@qq.com

nitide between 5 and 6, the radius is less than 500 km. In addition, the mercury anomalies before earthquakes are usually related to the underground fluid activity under the action of the seismogenic stress field. The isotope fractionation technology of mercury provides a new method to study the source of mercury in the fault zone and to explore the relation between mercury and fluid activity in the deep crust.

Key words: earthquake; water-soluble mercury; gaseous mercury; mercury isotope

0 引言

单质汞在自然界中呈液态, 具有高电离势、强附着力等特性, 容易与硫和金生成稳定的化合物 (吴少武, 1989; 康春丽和杜建国, 1999). 关于汞的地震预测最早可追溯到 20 世纪 60 年代中期, Fursov 等 (1968) 发现土壤中气汞的浓度异常变化与断裂带的位置吻合, 认为气态汞浓度异常可能与地震活动有关. 地震断裂带土壤中 Hg 的主要补给源包括区域背景、表层环境干扰以及断裂深部补给等, 三种补给源作用下的 Hg 相态转化、吸附与解吸附过程及影响因素相对复杂. 根据中国地震局划分, 地震预测预报分为长期预报 (几十年)、中期预报 (几年)、短期预报 (几个星期到数月)、临震预报 (几天到一个星期、甚至几个小时) (Wu et al., 2013), 其中汞是地下流体预测地震的重要前兆指标之一. 自我国 1985 年以来将测汞技术应用到地震预测, 已建成系统的监测网络, 其中以水汞 (水中化合汞和单质汞的总和) 和气汞 [水的溶解气和逸出气中的汞或断层土壤 (岩石) 气中的汞] 为对象的汞监测网分为固定观测网和流动观测网两类 (郭丽爽等, 2016), 固定观测网包括 Hg^{2+} 、 Hg^0 和化合物汞的总和, 流动网观测的主要是气汞浓度. 目前, 我国共建立了 600 多个地震流体观测站, 包括水文地球化学观察站 (Rn、 H_2 、He、Hg、离子组成等)、地下水观测站 (水位、流量) 和地热观测站 (水温、地温) 等. 有 1 500 多个地震相关观测项目, 包括 486 个水位观测、465 个水温观测、219 个氡观测、15 个断层氡观测、73 个汞观测和 264 个其它观测 (Wang et al., 2018). 为了初步了解汞作为国内地震预测的基本情况, 本文根据国内外有关文献, 对汞作为地震预测的相关研究进行总结和分析. 最后介绍了汞同位素示踪新技术用于地震预测的研究情况和提出汞预测地震的研究展望.

1 汞异常与地震活动关系

当前在地震预测探索中, 不少国家都利用地下

水或土壤里气体中的常量组分、微量组分、同位素组分及其它物理参量等展开研究和观测. 在地下水中, 汞浓度受多种因素的影响, 比如水的氧化还原性、水温、有机物含量、悬浮颗粒物的浓度和含水层电导率等, 有研究表明酸性地下水较碱性更易富集汞 (Johannesson and Neumann, 2013), 水汞浓度的异常主要出现在地震前, 表现为含量大幅度升高, 有的超出背景值几十倍. 在 1980 年代, 金仰芬等 (1987) 利用地下爆破实验进行了水汞和壤气汞的释放研究, 观测到了水汞由爆裂前 7.26~9.04 ng/L 升到最高值 25.6 ng/L. 孟广魁和何开明 (1997) 研究发现断层活动频率越高, 气汞的含量越高. 气汞的浓度异常表明隐伏断层是气汞迁移到地表的通道之一, 通过汞含量突发的异常曲线的时间、位置、形态、宽度和异常峰值能够判断活动断裂的位置、规模和相对活动性 (刘菁华等, 2006). 刘树田和邓金宪 (1998) 认为土壤气汞变化测试具有简单、快捷、稳定、灵敏等特性, 但是也要注意到气汞测量存在不稳定性, 易受到介质温度、湿度和土壤性质等因素的影响, 通常通过土壤气氡和气汞浓度相互参考来判定隐伏活动断层 (Wang et al., 2006; 张磊等, 2019). 综上所述, 通过观测断裂带中气汞和水汞的含量, 可了解地热动力活动、地壳应力应变等地壳运动信息, 抓取地震前兆异常, 进而为地震预报提供科学的依据.

2 地震引起汞异常的机理

通常汞在地下水中的主要存在形式为无机离子汞、有机结合汞和元素单质汞. 汞会在各种环境, 如空气、水体、土壤及岩石圈中存在, 在地壳中汞的平均丰度为 0.08×10^{-6} , 土壤中汞的浓度范围是 $(0.03 \sim 0.3) \times 10^{-6}$, 大气环境中汞的丰度为 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-6}$. 在不同的水体中汞的本底浓度区别较大, 但普遍较低, 例如内陆地下汞含量为 0.1×10^{-9} , 海水中汞浓度为 $(0.03 \sim 2) \times 10^{-9}$, 在泉水中汞浓度可能较高, 可达 8×10^{-8} 以上 (胡将军等, 2016). 关于地震的起因观点很多, 一般认为

在火山及地热地带发生的地震, 是由于地下垂直裂缝在流体压力下沿水平方向急剧扩张的结果(罗岚, 1997)。由于地震导致板块断裂、岩石开裂, 所处介质的温度和压力均发生变化, 汞蒸汽在强压、高温梯度作用下, 沿着断裂带、岩石裂缝和孔隙等从地壳深部向地表迁移, 在迁移过程中遇到不同介质形成汞的各种形态, 即气汞和水汞(王玉兰, 1995), 其中一部分会进入地下水中, 或从围岩裂隙以气态形式散发到地表, 使地下水及近地表壤气汞含量异常。由表 1 可知, 汞震前观测异常的情况

可能原因如下: (1) 由于应力场变化导致地球内部物质发生持续输运, 在震前初始阶段, 由于原来岩—水界面的平衡状态被打破, 导致汞被瞬间释放; (2) 气汞、水汞测量差异可能与平衡状态被打破之前构造环境有关, 包括温度、气压等造成汞物理形态的变化和相关元素导致的化学形态变化等; (3) 地震前期阶段由于大量汞被瞬间释放, 在应力场不进一步发展的情况下, 从地下深处到达地表的汞可以被吸附或溶解在不同介质中, 形成气汞异常, 导致地表汞观测量变小。

表 1 汞浓度的地震异常特征
Table 1 Anomalies of mercury concentration in earthquakes

地点	震级	发震时间	观测点	汞最大浓度/ (ng·L ⁻¹)	异常形态	异常至结束发震 时间/天	震中距/ km	背景值/ (ng·L ⁻¹)	衬值	观测形式
山西大同	6.1	1989-10-09	怀来4井	1668.5	多点突跳	20	120	23.8	70	水汞
云南洱源县	5.5	2013-03-03	洱源20号井	16.4	单点突跳和 多点突跳	17	27	10	1.64	水汞
			下关	404	单点突跳和 多点突跳	持续至地震当天	66	250	1.62	水汞
			弥渡	0.8	单点突跳	9	102	0.09	13.0	气汞
北京妙峰山	4.1	1985-11-21	北京铁路分局热水井	629	多点突跳	1	40	14.0	45.0	水汞
河北任县	5.1	1985-11-30	北京铁路分局热水井	-	-	1	125	-	-	水汞
云南宁蒗	5.4	1988-01-10	四川盐源井	3000	多点突跳	10	70	100	30	水汞
			西昌太和井	3640	多点突跳	25	180	70.0	52	水汞
四川会东	5.1	1988-04-15	西昌太和井	210	多点突跳	30	150	70.0	3	水汞
			盐源井	2500	多点突跳	5	170	25.0	100	水汞
河北阳原	4.8	1988-07-23	河北怀4	2000	多点突跳	21	125	100.0	20	水汞
云南澜沧	7.6	1988-11-06	西昌太和	2500	多点突跳	6	610	50	50	水汞
			昭觉	1500	多点突跳	6	650	50	30	水汞
			盐源	2500	多点突跳	6	530	125	20	水汞
云南宁蒗	5.7	2012-06-24	弥渡自流井	1.52	多点突跳	持续中爆发地震	260	0.15	10	气汞
云南宁洱	4.5	2012-07-30	弥渡自流井	1.29	多点突跳	6	270	0.15	10	气汞
云南彝良	5.6	2012-07-30	弥渡自流井	0.71	多点突跳	持续中爆发地震	-	0.15	0.5	气汞
山西大同	4.1	1993-08-30	奇村地热田水井	203	多点突跳	持续中爆发地震	190	29.0	7	水汞
山西五寨	4.8	1993-09-11		245	多点突跳	持续中爆发地震	110	29.0	8	水汞
山西灵石	4.8	1994-04-26		128	多点突跳	持续中爆发地震		29.0	4	水汞
青海门源	6.4	1986-08-26	壤气	0.18		持续中爆发地震		-	-	气汞
甘肃肃南	4.7	1988-12-04	古浪气体观测井	2.3		持续中爆发地震			10~20	气汞
甘肃临泽	4.5	1988-12-26	古浪气体观测井	1.7		持续中爆发地震			10~20	气汞
山东苍山	5.2	1995-09-20	十里泉电厂水源	333	多点突跳	持续中爆发地震	40	66.7	5.0	水汞
新疆呼图壁	4.1	1991-10-06	乌鲁木齐10号泉水	70	单点突跳	1	87	20	3.5	水汞
新疆和静	5.4	1993-02-03	乌鲁木齐10号泉水	240	单点突跳	5	210	34	7	水汞
新疆若羌	6.6	1993-10-02	乌鲁木齐10号泉水	240	多点突跳	26	610	51	4.7	水汞
云南姚安	6.5	2000-01-15	弥渡井	242	多点突跳	持续中爆发地震	70	90	2.7	水汞
河北张北	6.2	1998-01-10	怀来4井	516.5	多点突跳	47	120	100	5.17	水汞
河北张家口	3.7	2012-08-30	怀来4井	39.2	单点突跳	4	74	5.3	7.4	水汞
			怀来3井	0.005	单点突跳	持续中爆发地震	74	0.002	2.5	气汞

3 地震活动中的汞异常规律

1984 年国家地震局分析预报中心等有关单位与地矿部物化探研究所合作，首次将测汞技术应用于地震监测预报，并且认为汞作为一项短临预报指标在映震效能评价中是不可缺少的一种灵敏监测项，其中国内观测的汞的映震案例见表 1（张炜和巫英富，1989；常秋君和何跟巧，1990；王玉兰，1995；肖建华和张瑞丰，1997；王吉易和郑云贞，1998；马志峰和李金波，1999；康春丽等，2002；杨杰英，2002；褚金学等，2013；平彩鹏等，2013；车用太等，2015；高琼和邓嘉美，2015）。

由表 1 可知，相对于气汞，水汞观测到地震记录的案例较多，这与水汞本身特性有关，例如样品容易获取、检测不易受传输介质干扰、可观察到的异常幅度明显等。由于汞的向上迁移特性，使得震前汞异常首先在距震中最近的有利部位出现，因此处于断裂带上的温泉就是水汞迁移的最好通道之一（杨杰英，1999）。水汞可观测到的最大值为

3 640 ng/L，而气汞可观测到的最大值仅为 2.3 ng/L。本文现有案例中，地震发生前后可观测到汞的最高异常值为本底值的 0.5~100 倍之间，其中水汞为 1.62~100 倍，而气汞为 0.5~20 倍。总体上来看水汞的变化幅度大于气汞的变化幅度。这是因为气汞在升华过程中需要穿过不同介质（岩石、水、土壤等）迁移到地表，很容易产生吸附损失或者与介质发生反应导致其形态的变化，而水汞可以不断地溶出，具有代表性的水汞浓度日均变化和气汞浓度小时变化见图 1 和图 2。由于地震范围受震中距离和地震构造的双重制约，汞异常观测到的 5 级以上的地震具有以下特点：（1）水汞观测到的 5 级以上的地震大多发生在汞异常结束后，异常结束到发震时间间隔较长，异常结束后的发震时间间隔最长为 47 天，只有 3 个离震中较近的地区（分别为 40 km、66 km、70 km）汞异常持续到地震发生，而气汞异常大部分都是持续到地震发生。（2）震前汞的异常变化幅度较大，变化幅度为背景值的数倍乃至几十倍，这往往与震中距离、

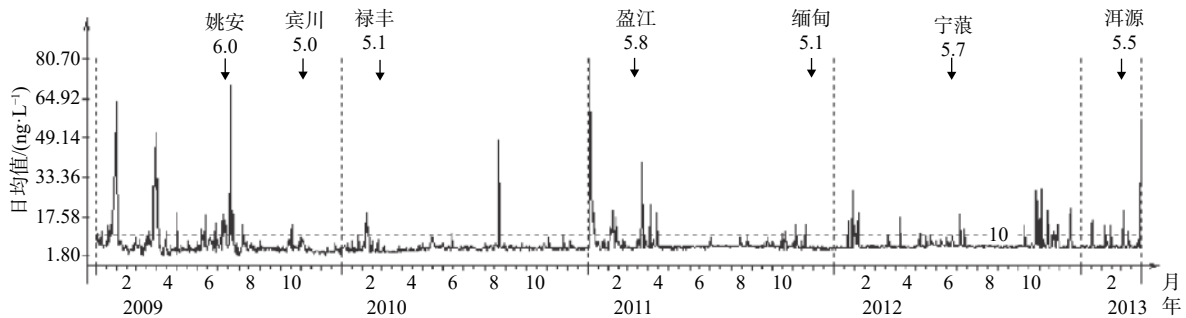


图 1 洱源 20 号井水汞日均值变化（高琼和邓嘉美，2015）

Fig. 1 Daily values of water-soluble mercury concentration in well 20 at Eryuan (Gao and Deng, 2015)

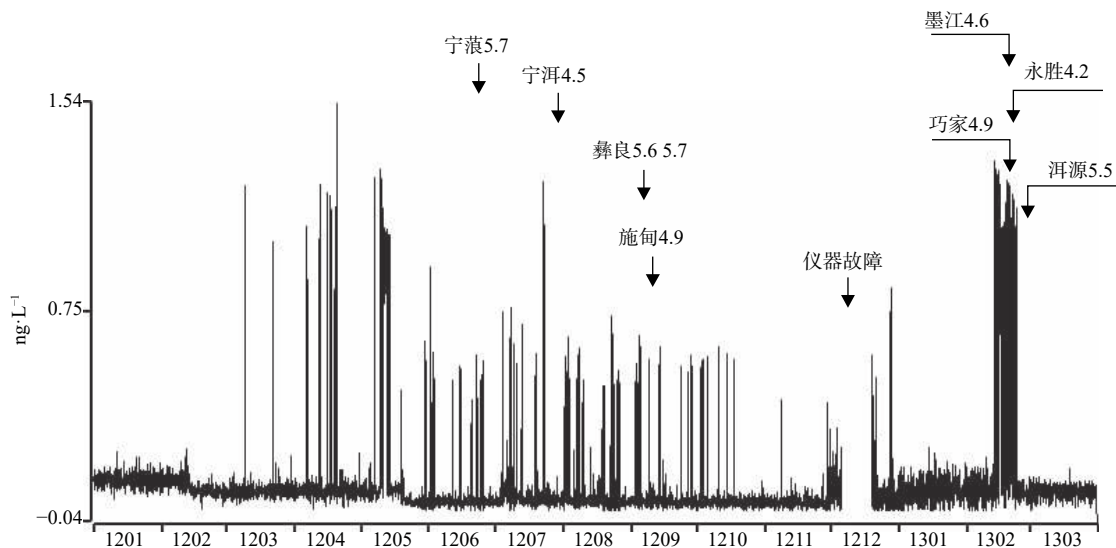


图 2 弥渡数字化气汞小时值曲线（2012 年 1 月至 2013 年 3 月）（褚金学等，2013）

Fig. 2 Hourly-values of gaseous-mercury concentration in wells at Midu (from January 2012 to March 2013) (Chu et al., 2013)

震级大小及地质构造有关(李海孝和宋晓冰, 1999)。例如 1988 年 4 月 15 日四川会东 5.1 级地震汞的异常幅度达 100 倍, 距离震中为 170 km; 1989 年 10 月 19 日山西大同 6.1 级地震汞的异常幅度达 70 倍, 距离震中为 120 km(宋贯一和杨同林, 1991)。震前汞的异常形态大部分呈多点突跳形式, 这可能和地震传播途径有关。异常观测点的数量越多震级越大, 如云南、青海、山西、四川等地的地震, 发震结束后又出现汞异常, 会出现连震。(3) 多个观测点都同时观测到汞的异常, 不同观测点汞的异常幅度可能不同, 甚至相差较大, 这种现象可能和观测点与发震构造部位的连通性有关, 观测点与震中属同一构造带时反应灵敏, 反之, 异常起始时间可能会滞后(李海孝和宋晓冰, 1999)。(4) 一般来说, 在发生强震和中等地震之前的 1~2 年, 地震预测前体突发异常, 一旦被确定为前震, 地震预测前体可以预测震中周围 400~500 km 的范围(Papadopoulos et al., 2010)。对 5 级及以下地震, 水汞异常范围大多约在 200 km 以内; 5~6 级地震映震范围多在 500 km 以内。总之, 汞异常超前于地震活动, 异常突出、易于识别、幅度大、作为地震的短临前兆的观测项, 具有很多的优越性(张炜和巫英富, 1989)。

4 同位素示踪技术与汞异常研究

汞元素在自然界中来源十分广泛, 大气汞主要来自火山与地热活动、土壤和水体表面挥发作用、植物蒸腾作用、森林火灾等(冯新斌等, 2009), 不同来源的汞同位素组成不同。以往对汞及其同位素的研究主要集中在生态学与地球表面环境, 自 1980 年代以来, 随着环境同位素在水循环中的迅速发展和一些新技术和新方法的广泛应用, 使得环境同位素示踪技术作为评价地震地下流体前兆信息成为可能。近年来快速发展的汞同位素技术, 为研究断裂带岩石、流体等介质中汞异常的来源提供了新的方法。汶川地震科学钻探 1 号孔(WFSD-1)第一次将汞及其同位素之间的关系用于研究地震过程中的断裂带和构造活动, 揭示不同剖面的汞同位素特征、地震破裂的过程(Gehrke et al., 2011; Sherman et al., 2010)。研究发现在主断层岩石和其它岩石之间有明显的汞同位素质量分馏和非质量分馏的特征, 由图 3 可知, 当流体沿着破裂带上升时, 汞从高温下的围岩中溶出, 成为液态单质汞, 随着

流体进一步上升, 流体开始变成沸腾态, 导致汞在液体和气泡间发生扩散, 使气体富集轻汞同位素, 液体在不同深度上残留了重汞同位素, 这些综合效应可以产生含有轻汞同位素的蒸汽/液体(Smith et al., 2005, 2008)。Zhang 等(2014)开展了汶川深钻岩心汞同位素组成的研究, 其结果给出了构造活动和深部热液流体对于汞同位素分馏的影响, 数据显示地震主断层较其他层位更易富集总汞。汞的同位素分馏提供了一种新的手段来解决断裂带汞的来源以及汞与深部流体活动的关系, 因此测定不同介质中汞的变化, 利用汞同位素特征研究断裂带深部汞的运移与富集, 可能对了解构造活动的情况有所帮助。

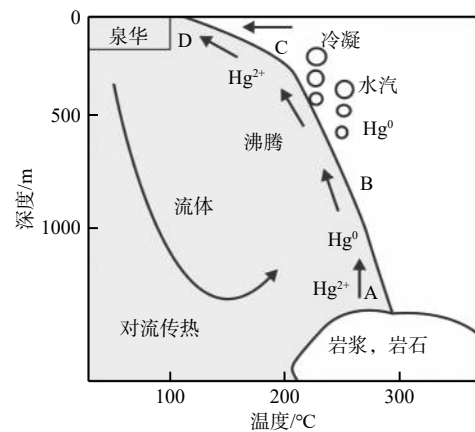


图 3 热液系统中的汞同位素分馏过程(修改自 Smith et al., 2005)

Fig. 3 Mercury isotope fractionation in hydrothermal systems (modified from Smith et al., 2005)

5 汞异常与地震预测的研究展望

震前汞的空间异常分布特征不仅与汞本身的形态有关, 还与区域构造应力场、周围的物理化学环境发生改变有关。在目前汞预测地震的案例中, 不是所有的观测点都会有相应的汞异常出现, 需要从以下几个方面着手改进并提高汞预测地震的准确度:

(1) 由于水汞取样便利、观测异常结束到发震时间间隔较长, 因此, 在预测短临地震时需要合理安排水汞观测站和气汞观测站的数量和比例。(2) 不同介质可能会影响到地表汞的观测, 因此收集地震观测站周围地球化学、气象条件及以往震例等背景资料, 分析可能的异常原因, 对汞异常变化准确预测地震尤为重要。(3) 测汞仪器的可靠性、检出限、精密度等仪器性能指标与是否能保持连续不

间断的监测是提高汞预测地震准确度的重要措施之一；(4) 汞的同位素分馏提供了一种新的手段来解决断裂带中汞的来源以及汞与深部流体活动的关系，采用汞同位素示踪新技术来研究断裂带深部汞的运移与富集，可能对了解构造活动的情况和长期预测地震有所帮助。

References

- Chang Q J, He G Q. 1990. Application of measuring method of mercury in gas of soil in precursor observation of earthquake[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 12(3): 79-85 (in Chinese).
- Che Y T, Yang L, He L, et al. 2015. The first coseismic effect record of mercury in gas[J]. *Earthquake Research in China*, 31(3): 602-604 (in Chinese).
- Chu J X, Zhang Y, Yang X Y, et al. 2013. Analysis of precursor anomaly of mercury in gas from digital monitoring in Midu[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, (4): 41-45 (in Chinese).
- Feng X B, Qiu G L, Fu X W, et al. 2009. Mercury pollution in environment[J]. *Progress in Chemistry*, 21(2): 436-457 (in Chinese).
- Fursov V Z, Vol'fon N B, Khvalovskiy A G. 1968. Results of a study of mercury vapor in the Tashkent earthquake zone[J]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 179: 208-210.
- Gao Q, Deng J M. 2015. Variation characteristics of short-term and impending anomalies of mercury in water in the near-source area of the Eryuan $M_{5.5}$ earthquake in 2013[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (12): 19-24 (in Chinese).
- Gehrke G E, Blum J D, Marvin-DiPasquale M. 2011. Sources of mercury to San Francisco Bay surface sediment as revealed by mercury stable isotopes[J]. *Geochimica ET Cosmochimica Acta*, 75(3): 691-705.
- Guo L S, Liu Y W, Zhang L, et al. 2016. Present situation and future development of the mercury precursory monitoring in China[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 38(2): 303-308 (in Chinese).
- Hu J J, Pan S W, Tang N, et al. 2016. Removal of Mercury in Flue Gas[M]. Beijing: China Electric Power Press (in Chinese).
- Jin Y F, Wu Z H, Huang H K, et al. 1987. The prospect of mercury measurement, monitoring and prediction of earthquakes[J]. *Earthquake*, (5): 8-16 (in Chinese).
- Johannesson K H, Neumann K. 2013. Geochemical cycling of mercury in a deep, confined aquifer: Insights from biogeochemical reactive transport modeling[J]. *Geochimica ET Cosmochimica Acta*, 106: 25-43.
- Kang C Y, Du J G. 1999. Geochemical characteristics of mercury and its seismic reflection efficiency[J]. *Geolog-Geochemistry*, (1): 79-84 (in Chinese).
- Kang C L, Zhu X Y, Deng S Q, et al. 2002. The form of mercury in groundwater and its application in earthquake monitoring[J]. *Environmental Chemistry*, 1(2): 205-206 (in Chinese).
- Li H X, Song X B. 1999. The relationship between abnormal concentration of mercury in Huai 4 well and earthquakes[J]. *North China Earthquake Sciences*, 17(3): 57-60 (in Chinese).
- Liu J H, Wang Z W, Liu S T, et al. 2006. Evaluation method of radon and mercury in gas of soil in urban active fault zone[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(2): 295-304 (in Chinese).
- Liu S T, Deng J X. 1998. Study on the measurement of mercury in gas of soil in active fault zone[J]. *Geological Review*, 44(5): 547-552 (in Chinese).
- Luo L. 1997. The evolution of earthquake mechanism theory[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (1): 23-27 (in Chinese).
- Ma Z F, Li J B. 1999. Anomaly characteristics of mercury in water in Shiliquan Power Plant before Cangshan $M_{5.2}$ earthquake in Shandong[J]. *Earthquake Research in Shanxi*, (1): 44-45 (in Chinese).
- Meng G K, He K M. 1997. Radon and mercury measurement used in the study of fault activity and segmentation[J]. *Earthquake Research in China*, 13(1): 43-5 (in Chinese).
- Papadopoulos G A, Charalampakis M, Fokaefs A, et al. 2010. Strong foreshock signal preceding the L'Aquila (Italy) earthquake ($M_w 6.3$) of 6 April 2009[J]. *Natural Hazards and Earth Systemences*, 10(1): 19-24.
- Ping C P, Zhang F Q, Zhang C H, et al. 2013. Analysis of short-term and impending anomaly of mercury in Huailai well before Zhangjiakou $M_{3.7}$ earthquake[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 34(5): 214-217 (in Chinese).
- Sherman L S, Blum J D, Johnson K P, et al. 2010. Mass-independent fractionation of mercury isotopes in Arctic snow driven by sunlight[J]. *Nature Geoscience*, 3: 173-177.
- Smith C N, Kesler S E, Klaue B, et al. 2005. Mercury isotope fractionation in fossil hydrothermal systems[J]. *Geology*, 33: 825-828.
- Smith C N, Kesler S E, Blum J D, et al. 2008. Isotope geochemistry of mercury in source rocks, mineral deposits and spring deposits of the California Coast Ranges, USA[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 269(3-4): 398-406.
- Song G Y, Yang T L. 1991. Hydrogen and mercury anomalies in Huailai No.4 well before the Datong Yanggao $M_{5.6}$ earthquake on October 19, 1989[J]. *North China Earthquake Science*, 9(1): 35-38 (in Chinese).
- Wang B, Liu Y W, Sun X L, et al. 2018. Hydrogeological and geochemical observations for earthquake prediction research in China: A brief overview[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 175: 2541-2555.
- Wang G, Liu C, Wang J, et al. 2006. The use of soil mercury and radon gas surveys to assist the detection of concealed faults in Fuzhou City, China[J]. *Environmental Geology*, 51(1): 83-90.
- Wang J Y, Zheng Y Z. 1998. Analysis of hydration precursor anomalies of Zhangbei $M_{6.2}$ earthquake and discussion of related issues[J]. *North China Earthquake Sciences*, 16(3): 46-52 (in Chinese).
- Wang Y L. 1995. Mercury in groundwater measurement in the seismically active area of Urumqi[J]. *Inland Earthquake*, (2): 158-162 (in Chinese).
- Wu S W. 1989. Current status and the application of concentration of radon in gas and mercury measurement technology[J]. *Advances in Earth Science*, (4): 16-20 (in Chinese).
- Wu Z, Ma T, Jiang H, et al. 2013. Multi-scale seismic hazard and risk in the China mainland with implication for the preparedness, mitigation, and management of earthquake disasters: An overview[J]. *In-*

- ternational Journal of Disaster Risk Reduction, 4: 21-33.
- Xiao J H, Zhang R F. 1997. Dynamic image analysis of mercury in water in the Qicun earthquake[J]. Acta Geoscientia Sinica: Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, (18): 412 (in Chinese).
- Yang J Y. 1999. Analysis on the abnormal characteristics of the precursor of remote and local earthquakes of mercury in water in Yunnan[J]. Earthquake Research, 22(1): 64-70 (in Chinese).
- Yang J Y. 2002. Analysis on the abnormal characteristics of mercury in water in Yunnan before the Yao'an $M_{6.5}$ earthquake[J]. Plateau Seismology, 14(4): 36-41 (in Chinese).
- Zhang L, Liu Y W, Guo L S, et al. 2014. Isotope geochemistry of mercury and its relation to earthquake in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1)[J]. Tectonophysics, 619-620: 79-85.
- Zhang L, Liu Y W, Bao C, et al. 2019. Distribution characteristics of soil mercury in Anninghe fault zone[J]. Acta Seismologica Sinica, 41(2): 249-258 (in Chinese).
- Zhang W, Wu Y F. 1989. A new index of imminent earthquake anomalies—detection of mercury concentration[J]. Earthquake Research in China, 5(4): 13-19 (in Chinese).
- 金仰芬, 伍宗华, 黄宏库, 等. 1987. 汞量测量监测预报地震的前景[J]. 地震, (5): 8-16.
- 康春丽, 杜建国. 1999. 汞的地球化学特征及其震效能[J]. 地质地球化学, (1): 79-84.
- 康春丽, 朱祥岩, 邓守琴, 等. 2002. 地下水中汞的赋存形式及其在地震监测中的应用[J]. 环境化学, 1(2): 205-206.
- 李海孝, 宋晓冰. 1999. 怀 4 井汞量异常与地震的关系[J]. 华北地震科学, 17(3): 57-60.
- 刘菁华, 王祝文, 刘树田, 等. 2006. 城市活动断裂带的土壤汞、汞气评价方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 36(2): 295-304.
- 刘树田, 邓金宪. 1998. 活动断裂带的壤中气汞量测量研究[J]. 地质论评, 44(5): 547-552.
- 罗岚. 1997. 地震机理理论的演变[J]. 国际地震动态, (1): 23-27.
- 马志峰, 李金波. 1999. 山东苍山 5.2 级地震前十里泉电厂汞异常特征[J]. 山西地震, (1): 44-45.
- 孟广魁, 何开明. 1997. 汞、汞量用于断裂活动性和分段的研究[J]. 中国地震, 13(1): 43-5.
- 平彩鹏, 张凤秋, 张常慧, 等. 2013. 张家口 $M_{3.7}$ 地震前怀来水汞短临异常分析[J]. 地震地磁观测与研究, 34(5): 214-217.
- 宋贯一, 杨同林. 1991. 1989 年 10 月 19 日山西大同—阳高 6.1 级地震前怀来四号井氢、汞异常[J]. 华北地震科学, 9(1): 35-38.
- 王吉易, 郑云贞. 1998. 张北 6.2 级地震的水化前兆异常分析及有关问题讨论[J]. 华北地震科学, 16(3): 46-52.
- 王玉兰. 1995. 乌鲁木齐地震活动区的地下水汞测量[J]. 内陆地震, (2): 158-162.
- 吴少武. 1989. 氦射气浓度和汞量测量技术的现状与应用[J]. 地球科学进展, (4): 16-20.
- 肖建华, 张瑞丰. 1997. 奇村地震汞动态图象分析[J]. 地球学报: 中国地质科学院院报, (18): 412.
- 杨杰英. 1999. 云南水汞的远震和近震前兆异常特征分析[J]. 地震研究, 22(1): 64-70.
- 杨杰英. 2002. 云南水汞在姚安 6.5 级地震前的异常特征分析[J]. 高原地震, 14(4): 36-41.
- 张磊, 刘耀炜, 包创, 等. 2019. 安宁河断裂带土壤汞的分布特征[J]. 地震学报, 41(2): 249-258.
- 张炜, 巫英富. 1989. 地震短临异常新指标的探索—汞浓度探测[J]. 中国地震, 5(4): 13-19.

附中文参考文献

- 常秋君, 何跟巧. 1990. 壤中气汞量测量方法在地震前兆观测中的应用[J]. 西北地震学报, 12(3): 79-85.
- 车用太, 杨丽, 何镗, 等. 2015. 气汞的第一个同震效应记录[J]. 中国地震, 31(3): 602-604.
- 褚金学, 张源, 杨晓莹, 等. 2013. 弥渡数字化气汞前兆异常分析[J]. 四川地震, (4): 41-45.
- 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 2009. 环境汞污染[J]. 化学进展, 21(2): 436-457.
- 高琼, 邓嘉美. 2015. 2013 年洱源 5.5 级地震近源区多点水汞短临异常变化特征[J]. 国际地震动态, (12): 19-24.
- 郭丽爽, 刘耀炜, 张磊, 等. 2016. 地震地下流体汞前兆监测现状与发展方向[J]. 地震工程学报, 38(2): 303-308.
- 胡将军, 盘思伟, 唐念, 等. 2016. 烟气脱汞 [M]. 北京: 中国电力出版社.