

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.03.2014061901

张磊, 刘耀炜, 郭丽爽, 等. 断裂带中汞的地球化学特征[J]. 环境化学 2015, 34(3): 497-504

ZHANG Lei, LIU Yaowei, GUO Lishuang, et al. Geochemistry of mercury in the fault zone[J]. Environmental Chemistry 2015, 34(3): 497-504

## 断裂带中汞的地球化学特征\*

张磊<sup>1,2</sup> 刘耀炜<sup>2\*\*</sup> 郭丽爽<sup>2</sup> 张国盟<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京, 100081; 2. 中国地震局地壳应力研究所(地壳动力学重点实验室), 北京, 100085)

**摘要** 汞是揭示构造活动及强震孕育机制的重要化学示踪元素. 研究断裂带中汞及其同位素, 可以示踪地震断裂带汞异常来源、汞的迁移路径, 从而揭示流体在地震孕育中的作用. 本文总结了汞的观测技术, 断裂带岩石、土壤和地下水中汞的特征, 概述了汞同位素技术在深部断裂带研究中的进展, 以及汞在地震监测和活断层探测方面的应用. 断裂带中汞的研究, 将有助于厘清汞-深部流体-构造活动-地震的可能关系及其机制, 对提升汞在地震监测预测中的研究水平具有重要的理论意义和应用价值.

**关键词** 汞, 汞同位素, 断裂带, 地震.

## Geochemistry of mercury in the fault zone

ZHANG Lei<sup>1,2</sup> LIU Yaowei<sup>2\*\*</sup> GUO Lishuang<sup>2</sup> ZHANG Guomeng<sup>2</sup>

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, 100081, China;

2. Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing, 100085, China)

**Abstract:** As an important chemical tracer, mercury can reveal tectonic activity and mechanism of strong earthquakes preparation. Research on mercury and its isotopic composition in fault zones can be used for tracing sources of mercury anomalies within fault zone, analyzing the migrated paths of mercury, and determining the role of fluid in seismogenesis. This paper summarizes the analytical method of mercury as well as its characteristic in rock, soil and groundwater in the fault zone, introduces the recent progress of mercury stable isotopes in the deep fault zone, and overviews its applications on earthquake monitoring and the detection of active faults. This study aims to further explore the relationships and mechanisms of mercury, deep fluid, tectonic activity and earthquake. Research on mercury and its isotopes in fault zone may have important scientific significance and applied value in further study about the role of mercury observations in earthquake monitoring and prediction.

**Keywords:** mercury, isotope, fault zone, earthquake.

断裂带记录了与地震密切相关的岩石和流体特性<sup>[1-2]</sup>, 同时断层中富含地震的孕育与发生信息, 台湾车笼埔断层与汶川地震断裂带上开展的科学钻探都证实了这一点<sup>[3-5]</sup>. 流体的运移与其发生的不均匀性渗透能够在断层上产生巨大的局部主应力<sup>[6]</sup>, 使断层失稳从而引发地震. 流体能够促发和影响前震、主震和余震<sup>[7-8]</sup>, 流体在地震前后扮演了重要角色<sup>[9]</sup>.

汞元素在揭示断裂带流体与地震孕育发生的关系中发挥了重要作用<sup>[10-11]</sup>. 下地壳与上地幔的汞(Hg)在流体的携带或者压力梯度作用下沿着断裂或岩石裂隙向地表迁移, 在断裂带上方形成岩石、土

2014年6月19日收稿.

\* 地震行业科研专项(201308006); 国家科技支撑项目“汶川地震断裂带科学钻探”(WFSD-10); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2014-08)资助.

\*\* 通讯联系人, E-mail: liuyw20080512@126.com; Tel: 010-62911045

壤和地下水中汞浓度异常,由此汞在地震监测预测和活断层探测方面得到广泛应用<sup>[11-14]</sup>。近年来快速发展的汞同位素技术<sup>[15]</sup>,为研究断裂带岩石、流体等介质中汞异常的来源问题提供了新的方法,为探讨汞异常-深部流体-构造活动-地震之间的物理化学机制提供了新的技术途径。

本文在查阅前人研究成果的基础上,从汞的观测技术着手,概述了断裂带岩石、土壤和地下水中汞的特征,分析了汞同位素分馏及其示踪应用的最新进展,讨论了断裂带深部汞同位素特征,同时,阐述了汞在地震监测与活断层探测方面的应用,并对断裂带汞研究中的观测技术、汞地球化学行为的影响因素和应用前景进行了展望。

## 1 汞的观测技术

汞的化学性质活泼,具有较强的氧化还原性,以  $\text{Hg}^0$ 、 $\text{Hg}^+$  和  $\text{Hg}^{2+}$  等 3 种价态存在。在我国地震部门汞的监测中,主要开展的是断裂带井(泉)水、断层带土壤气和井口逸出气中汞浓度的监测<sup>[16]</sup>。部分学者开始关注于断裂带深部钻探岩石中的总汞(THg)及其同位素<sup>[11]</sup>。涉及到的观测对象主要包括液体、气体和固体。

我国于 20 世纪 80 年代中期开始进行地震地下流体汞观测,主要使用 XG-4、RG-BS 和 XG-5Z 型测汞仪进行水汞浓度观测, RG-BQZ 和 JM-4 型测汞仪开展气汞观测<sup>[16]</sup>。20 世纪 90 年代中期,我国数字化观测台站中使用 DFG-B 型测汞仪,进行逸出气、断层气汞( $\text{Hg}^0$ )浓度的连续观测<sup>[16]</sup>。21 世纪引进了意大利 Milestone DMA-80、俄罗斯 Lumex RA915+塞曼效应测汞仪<sup>[17]</sup>,不需要对样品进行前处理,避免了汞的损失和污染。付学吾等<sup>[18]</sup>使用 Lumex RA-915AM 与 Tekran 2537A 对城区的大气汞进行了连续高时间分辨率的观测,二者均能准确测定大气总汞含量。近年来,多接收等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)可以精确地检测 Hg 同位素<sup>[15]</sup>,这为区分深浅部汞的来源提供了新的手段。

## 2 断裂带中的汞

汞由于其特殊的物理化学性质,易在断裂带岩石、土壤和地下水出现汞的异常<sup>[19]</sup>。因此测定不同介质中汞的变化,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<sup>[20]</sup>。

### 2.1 深部断裂带岩石中的汞

实验表明岩石在受到压力临破裂前有汞的析出,因此在地壳中各种断裂处可富集汞<sup>[21]</sup>。断裂带中气态汞在上升过程中,容易吸附在断层泥中<sup>[22]</sup>,因此断裂带岩石中的总汞含量被用来确定地震的主滑动面与破裂过程<sup>[10]</sup>。汶川 Ms 8.0 级地震后开展的汶川断裂带科学钻探工程(WFSD)<sup>[23-24]</sup>发现在汶川地震主破裂部位岩心样品中存在高浓度的总汞异常<sup>[10]</sup>。总汞含量的差异性主要与岩石破裂程度和其中黏土矿物含量密切相关,而这两种因素是由于地震活动导致的<sup>[11]</sup>。总汞浓度的分布方式表明了深部流体可能对汶川 Ms 8.0 级地震的孕育与发生发挥作用<sup>[10]</sup>。

断裂带的破碎程度和断裂面的闭合与开启程度也会引起汞含量分布的不均,高汞值易出现于断层的上盘<sup>[25]</sup>。普通硅质岩和碳质硅质岩可能指示深大断裂活动及形成,其汞的平均含量更高( $>100 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[26]</sup>。这与汞沿断裂运移上升和吸附作用有一定关系。尽管地幔介质中汞的平均丰度是地壳的  $1/9$ <sup>[19]</sup>,但是非洲金伯利岩管中的橄榄岩和榴辉岩的捕虏体中汞含量都高达  $780 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $640 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[27]</sup>,这可能表明了地壳深处或上地幔的岩石中有较高汞含量的矿物。

### 2.2 地表断裂带土壤中的汞

自然汞是地球深部脱气作用和地幔物质长期分异过程中发生的蒸馏作用的产物<sup>[28]</sup>。强烈的构造活动改变了地下温度与压力,使各种汞化合物升华,由于汞扩散、穿透能力很强,在地下深处形成的汞蒸气在压力梯度的作用下沿构造裂隙上升至地表<sup>[29-30]</sup>,形成深大断裂上方大气以及断裂带土壤气中汞含量异常。

地震活动区土壤中汞含量明显高于外围地区<sup>[31]</sup>,这种异常是由构造活动引起汞释放的结果。汶川 Ms 8.0 级地震地表破裂带土壤气汞含量结果显示,汞的高值异常出现在地震破裂带上<sup>[32]</sup>。根据断裂带土壤气汞异常特征能够判断断层的位置、产状和性质。对于影响汞分布的因素,李营等<sup>[33]</sup>对华北延怀盆地土壤气观测研究认为,汞的分布特征受深部供给源、地壳结构与区域构造、地层和地-气交换等因素的

影响.土壤气汞含量还受到温度的影响,季节和环境的短期变化影响气汞逸出,主要原因在于吸附-解吸作用控制了汞的运移,冬季由于固体的吸附作用增强,导致土壤中汞蒸气含量降低,春天土壤温度升高时,土壤释放出所吸收的汞<sup>[34]</sup>.土壤湿度、植被和大气降水对土壤气汞含量也存在着影响<sup>[35]</sup>.

### 2.3 地下水中的汞

断裂带中的汞易富集在水中,因此观测断裂带井(泉)水汞浓度随时间的变化成为监测地震活动的一种指标<sup>[29]</sup>.通过观测水汞浓度的多年趋势动态,能够很好地判定地壳应力的变化及地震孕育与发生过程.起伏型是较为常见的水汞浓度多年变化动态,起伏无规律,水汞浓度的年动态主要表现为夏高冬低<sup>[36]</sup>.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,超出背景值几十倍,反映出地壳深部岩石的破裂过程<sup>[21]</sup>.在地下水中,汞浓度受多种因素的影响,比如围岩的岩性、水的氧化还原性、温度、总有机物含量、悬浮微粒的数量和含水层电导率等<sup>[37-38]</sup>.酸性较碱性地下水易富集汞<sup>[37]</sup>.

## 3 汞同位素及其在断裂带中的特征

### 3.1 汞的同位素研究进展

过去 10 年,汞同位素地球化学研究取得了突飞猛进的发展,并逐渐成为地球科学和环境科学一个重要的研究方向<sup>[15]</sup>.相关研究人员对汞同位素分馏现象做了详细的研究,比如吸附、蒸发、光化学反应、微生物作用、甲基化等物理化学过程<sup>[39-44]</sup>,发现汞存在非质量同位素分馏(MIF)现象.作为少有的存在非质量分馏的重金属,汞的 MIF 提供了一种新方法用于研究如光致还原这种特定的化学过程<sup>[45]</sup>.在地质研究中 Smith 等<sup>[46]</sup>对热液系统中汞同位素如何分馏做了模型概括; Smith 等<sup>[47]</sup>调查了典型地壳岩石的汞同位素组成; Zambardi 等<sup>[48]</sup>论述了火山区气体汞的排放和其稳定同位素的组成; Sherman 等<sup>[49]</sup>认为幔源汞可能比地壳中汞更易富含重同位素.国内已经掌握了汞同位素测定技术并开展了研究工作.尹润生等<sup>[50]</sup>对多接收电感耦合等离子体质谱法高精密度测定汞同位素实验方法进行了改进; Feng 等<sup>[51]</sup>应用汞的同位素组成研究了沉积物中汞的污染源; 侍文芳等<sup>[52]</sup>分析了泥炭中高分辨的汞同位素沉积记录等.

研究表明,汞同位素方法在判定汞的源汇问题上具有重要的示踪意义,汞同位素技术能作为一种有效的工具来追踪和定量分析环境中汞源及迁移路径<sup>[53-54]</sup>.相关研究者借助二/三元混合模型识别汞来源问题<sup>[51,55]</sup>.Foucher 和 Hintelmann<sup>[53]</sup>证明了汞的稳定同位素可用于示踪自然系统中汞的来源; Liu 等<sup>[56]</sup>应用三元模型区分出水系沉积物中汞的主要来源; Yin 等<sup>[57-59]</sup>对贵州万山汞矿区汞同位素地球化学循环进行了详细而系统的研究,其结果对示踪不同汞污染源的环境效应具有重要意义.汞的同位素对于示踪汞源及指示汞的地球化学过程具有重要的作用,关于汞同位素的详细内容可以参考 Yin 等<sup>[60]</sup>、王柱红等<sup>[61]</sup>和 Blum 等<sup>[62]</sup>文献.

### 3.2 断裂带中汞的同位素分馏

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.断裂带深部流体在上升过程中,逐渐变冷,流体中  $\text{CO}_2$  呈气泡析出, pH 值的增大和流体温压的降低令汞的溶解度降低,到近地表处流体降到大约 100—150 °C,  $\text{CO}_2$  量变少,断层顶部的开放空间出现汞的沉淀<sup>[63]</sup>.在图 1 中,当流体沿着破裂带上升时,发生冷却开始变成沸腾态,沸腾的流体中,汞在液体和气泡间发生扩散,使气体富集轻同位素,液体在不同深度上残留了重同位素;接近地表时,水汽中的  $\text{Hg}^0$  与富含氧的地下水混合,  $\text{Hg}^0$  被氧化成  $\text{Hg}^{2+}$ , 然后与水汽中的  $\text{H}_2\text{S}$  反应沉淀生成  $\text{HgS}$ ; 如果深部的热液逸出地表,会与  $\text{H}_2\text{S}$  反应形成  $\text{HgS}$ , 富集汞的重同位素;汞的同位素分馏主要集中在图 1 B、C、D 阶段,尤其是靠近热液系统的上部,在从源岩到热液溶解作用过程中汞不发生或者发生少量的同位素分馏<sup>[46]</sup>.

汶川地震断裂带科学钻探 1 号孔样品汞含量结果表明了汶川 Ms 8.0 级地震存在流体的活动<sup>[10]</sup>,但一些关键问题还需深入研究.比如总汞高值异常是断裂带多次破裂累积形成的,还是通过地震新生断裂面由深部流体迁移携带上来的? 深层断裂带岩样总汞含量异常与浅层岩样或地表土壤汞分别具有哪些特征? 等等.解决这些问题则需要更加深入地研究和获取详实的科学证据,其中利用汞同位素特征方法,可能是揭开这些科学问题之谜的有效技术途径. Zhang 等<sup>[11]</sup>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  $^{200}\text{Tl}$  断层泥中汞同位素组成的差异性, 主要与是否存在热液流体活动有关.

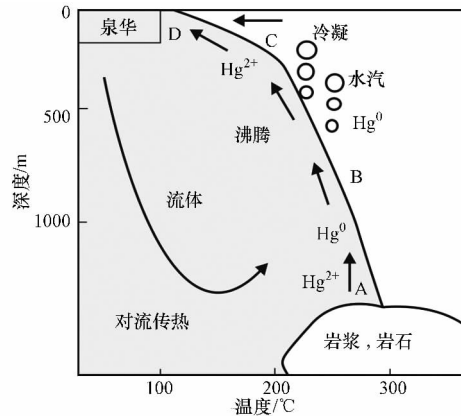


图 1 热液系统中的汞同位素分馏过程(引自文献[46])

Fig.1 Mercury isotope fractionation in hydrothermal systems( after Ref. [46])

#### 4 断裂带汞的应用

在断裂带上易形成土壤气汞和地下水中汞浓度异常, 因此, 观测地下水和土壤中的汞浓度是地震预测研究和活断层探测的重要方法之一<sup>[64]</sup>.

##### 4.1 汞与地震前兆

国际上关于汞与地震的研究起始于 20 世纪 60 年代<sup>[31]</sup>, King<sup>[65]</sup> 认为气体地球化学手段能够用来预测地震, 其中汞能够作为一种有效的手段用于地震短临预测. 地震监测中通过观测汞浓度的变化, 来获得地震孕育信息. 汞具有很好的映震效应<sup>[66]</sup>, 汞浓度的动态异常变化与地震活动在时空分布上密切相关. 一些汞观测点观测到明显的震前异常, 主要表现为震前汞浓度出现高值突跳, 汞浓度异常大多在震前结束. 比如 1988 年云南宁蒗 5.4 级地震前, 距离震中 200 km 内的盐源和西昌太和观测井水中汞浓度开始升高至背景值的数十倍(图 2), 异常持续接近百天, 但是距离震中 250 km 的昭觉井, 震前没有观测到汞浓度的明显异常<sup>[67]</sup>. 根据汞浓度的异常持续时间与异常分布范围, 可以进行震级和发震时间的预测<sup>[36]</sup>. 张炜等<sup>[67]</sup> 认为汞的异常反映范围随地震震级增大而增大, 5 级左右的地震其异常反映范围在 200 km 左右. 因此, 汞在地震短临监测预测中可以发挥显著作用.

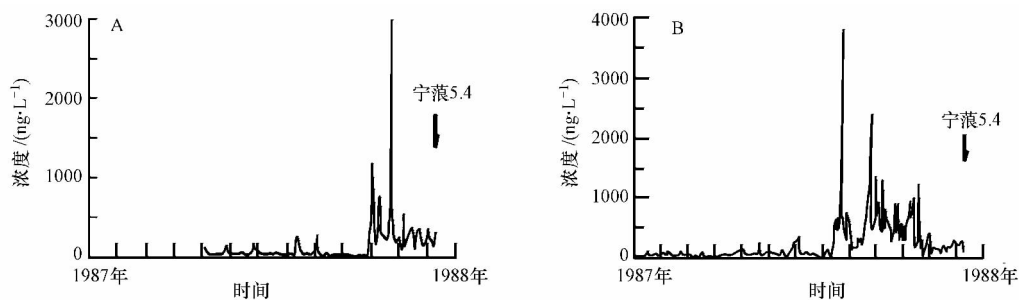


图 2 四川盐源井(A)和太和井(B)水汞浓度在宁蒗地震前的变化(引自文献[67])

图中横坐标一个刻度代表一个月

Fig.2 The concentrations of Hg in Well Yanyuan (A) and Taihe (B) before Ninglang earthquake ( after Ref. [67] ).

Each scale represents a month on the horizontal axis

##### 4.2 汞与隐伏活断层探测

测定断层及其附近土壤中气汞的含量能够确定断层活动性<sup>[25, 68]</sup>. 断层活动性越强, 气汞的含量越高<sup>[13]</sup>. 气汞含量的异常表明隐伏断层提供了气汞上升的通道, 证实了隐伏断层的活动性<sup>[69]</sup>. 通常由汞含量异常曲线的位置、形态、宽度和异常峰值, 能够判断活动断裂的位置、产状、规模及相对活动性<sup>[70-71]</sup>, 比如兰州某断裂带上土壤气汞含量呈峰值形态, 直立正断层上方的汞异常值相对较低, 异常宽度带也

小, 倾角较缓的逆冲断层易在断层上盘形成较大宽度的气汞浓度异常<sup>[72]</sup>。土壤气汞含量测试简单、快捷、稳定且灵敏, 但是也需注意到气汞测量存在不稳定性, 易受到温度、湿度和土壤性质等因素的影响<sup>[71]</sup>。通常通过土壤气氦和气汞含量相互结合来判定隐伏活断层<sup>[73]</sup>。

## 5 结果与展望

自然汞主要来源于下地壳与上地幔, 并易于富集在土壤、水体、岩石、矿产等介质中, 前人对这些介质中的汞地球化学特征做了详细的研究。汞在地下通过断裂带运移到地球表面, 由于其特殊的物理和化学性质, 在地质学、地球化学等领域得到广泛应用, 比如地震监测预测、隐伏活断层探测、火山喷发等研究。但是目前有关断裂带汞开展的工作多局限于地球表层, 如土壤和浅部含水层, 而地球深部尤其是深大断裂带内部的研究仍然比较少, 观测技术与理论方面仍存在许多值得深入讨论的问题。

### (1) 汞的观测技术

目前, 我国地震部门日常监测水和气中总汞含量, 通常背景值较低。使用的测汞仪繁琐费时、观测精度不高, 而且存在着仪器老化严重、观测手段陈旧的问题。在水汞含量日常观测中, 汞的背景值波动大、试剂背景值高、观测结果的离散度大等问题严重影响了汞观测资料的质量<sup>[74]</sup>。因此迫切需要开展严格的观测方法实验, 需要测试精度较高的仪器, 而且测试仪器使用便捷、稳定性好、标定准确, 测试方法要避免试剂对样品的污染。借鉴其他领域内关于汞的测试技术<sup>[75-76]</sup>, 制定合理可行的技术标准, 提高汞观测数据的准确性和精确性。对于断裂带汞的观测主要涉及对象为岩石、地下水(泉水)和土壤气(地下水逸出气), 那么不同对象需要不同的测试仪器, 主要发展方向为总汞的直接观测、痕量汞的测试、汞同位素和汞形态分析技术。多种测试技术相结合, 有利于促进断裂带汞观测结果的准确性, 提升断裂带汞的研究水平。

### (2) 汞地球化学行为的影响因素判定

汞在地震前兆观测和隐伏活断层探测等方面应用研究非常广泛, 同时也取得了重要进展。但以上对汞的观测研究仅借助于总汞含量。在地震断裂带汞的研究中, 影响汞浓度的因素较多, 用观测值幅度等特征来分析地震前兆特征、断层活动性以及深部流体在地震孕育、发生过程中的作用等科学问题, 存在较大的不确定性。主要的问题是科学判定观测到的汞浓度异常是来源于地表环境的变化<sup>[77]</sup>, 还是真正来源于深部流体的迁移过程等。迫切需要一种新的手段解决观测上的不确定性, 可能汞同位素和形态汞的结果能够进一步解释这些问题。

### (3) 应用前景

汞的应用主要涉及到地震前兆观测和活断层探测, 那么提高汞的观测技术水平、厘清影响断裂带汞观测的影响因素, 将极大地开阔汞的应用前景。近些年发展起来的汞同位素技术, 为示踪汞源以及解释汞的地球化学过程提供了新手段。借助科学钻探获得断裂带深部地质、地球化学剖面, 同时结合汞同位素及其他元素示踪技术研究汞的迁移转化路径, 可能揭示汞与地震孕育发生的关系。这对于解释地震断裂带断层泥上的总汞异常是古地震还是新生地震所引起, 以及断裂带总汞异常是否由深部流体通过地震新生断裂面迁移携带上来提供了一种新的方法。因此, 汞同位素技术对于解释汞异常与地震的对应关系、流体在地震孕育和发生中的重要作用提供了一种新思路。

目前对于断裂带汞的研究, 已从简单的土壤气汞含量观测, 发展到断裂带深部岩石总汞的研究, 以及利用汞同位素来探究汞的来源。因此系统地研究断裂带深部汞及其同位素的分馏特征, 可以为分析流体与构造活动之间的关系提供依据, 对于深刻理解流体在断裂带中的行为具有重要作用。同时, 对于进一步厘清汞-深部流体-构造活动-地震的可能关系及其机制, 促进地震监测预报中汞的观测研究和丰富地震地下流体学中有关汞的理论具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Chen W M D, Tanaka H, Huang H J, et al. Fluid infiltration associated with seismic faulting: Examining chemical and mineralogical compositions of fault rocks from the active Chelungpu fault[J]. *Tectonophysics*, 2007, 443(3/4): 243-254
- [2] Caine J S, Bruhn R L, Forster C B. Internal structure, fault rocks, and inferences regarding deformation, fluid flow, and mineralization in the

- seismogenic Stillwater normal fault ,Dixie Valley ,Nevada[J]. *Journal of Structural Geology* ,2010 ,32( 11) : 1576–1589
- [ 3 ] Kuo L W ,Song S R ,Yeh E C ,et al. Clay mineral anomalies in the fault zone of the Chelungpu Fault ,Taiwan ,and their implications [J]. *Geophysical Research Letters* ,2009 ,36 , L18306 ,DOI: 10.1029/2009GL039269
- [ 4 ] Wang H ,Li H ,Si J ,et al. Internal structure of the Wenchuan earthquake fault zone ,revealed by surface outcrop and WFSD-1 drilling core investigation [J]. *Tectonophysics* ,2014 ,619–620: 101–114 ,DOI: 10.1016/j.tecto.2013.08.029
- [ 5 ] Si J ,Li H ,Kuo L ,et al. Clay mineral anomalies in the Yingxiu–Beichuan fault zone from the WFSD-1 drilling core and its implication for the faulting mechanism during the 2008 Wenchuan earthquake ( Mw 7.9) [J]. *Tectonophysics* ,2014 ,619–620: 171–178 ,DOI: 10.1016/j.tecto.2013.09.022
- [ 6 ] Nemcok M ,Henk A ,Gayer R A ,et al. Strike-slip fault bridge fluid pumping mechanism: insights from field-based palaeostress analysis and numerical modelling [J]. *Journal of Structural Geology* ,2002 ,24( 12) : 1885–1902
- [ 7 ] Miller S A ,Colletinni C ,Chiaraluce L ,et al. Aftershocks driven by a high-pressure CO<sub>2</sub> source at depth [J]. *Nature* ,2004 ,427( 6976) : 724–727
- [ 8 ] Liu Y ,Chen T ,Xie F ,et al. Analysis of fluid induced aftershocks following the 2008 Wenchuan Ms 8.0 earthquake [J]. *Tectonophysics* ,2014 ,619–620: 149–158 ,DOI: 10.1016/j.tecto.2013.09.010
- [ 9 ] Ishikawa T ,Tanimizu M ,Nagaiishi K ,et al. Coseismic fluid-rock interactions at high temperatures in the Chelungpu fault [J]. *Nature Geoscience* ,2008 ,1( 10) : 679–683
- [10] 刘耀炜 杨多兴 谢富仁 等. 汶川地震断裂带科学钻探 WSFD-1 井垂直剖面特征 [C]. 中国地球物理-中国地球物理学会第二十六届年会 ,中国地震学会第十三次学术大会论文集. 北京: 地震出版社 ,2010: 135
- [11] 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) [J]. *Tectonophysics* ,2014 ,619–620: 79–85 ,DOI: 10.1016/j.tecto.2013.08.025
- [12] 陈燕 石绍先 刘强. 云南水汞群体非均匀度异常与成组强震活动关系 [J]. *西北地震学报* ,2007 ,29( 2) : 161–164
- [13] 孟广魁 何开明. 汞、汞测量用于断裂活动性和分段的研究 [J]. *中国地震* ,1997 ,13( 1) : 43–51
- [14] 王传远 杜建国 周晓成. 三河-平谷活断层汞地球化学特征 [J]. *地震* ,2004 ,24( 1) : 132–136
- [15] Yin R ,Feng X ,Shi W. Application of the stable-isotope system to the study of sources and fate of Hg in the environment: A review [J]. *Applied Geochemistry* ,2010 ,25( 10) : 1467–1477
- [16] 刘耀炜. 我国地震地下流体科学 40 年探索历程回顾 [J]. *中国地震* ,2006 ,22( 3) : 222–235
- [17] 王翠萍 闫海鱼 刘鸿雁 等. 使用 Lumex 测汞仪快速测定固体样品中总汞的方法 [J]. *地球与环境* ,2010 ,38( 3) : 378–382
- [18] 付学吾 冯新斌 张辉. 贵阳市大气气态总汞: Lumex RA-915AM 与 Tekran 2537A 的对比观测 [J]. *生态学杂志* ,2011 ,30( 5) : 939–943
- [19] 康春丽 杜建国. 汞的地球化学特征及其映震效能 [J]. *地质地球化学* ,1999 ,27( 1) : 79–84
- [20] Jin Y ,Wu Z ,Shen C ,et al. Earthquake prediction through the observation and measurement of mercury content variation in water [J]. *Journal of Geochemical Exploration* ,1989 ,33( 1) : 195–202
- [21] Varshal G M ,Sobolev G A ,Barsukov V L ,et al. Separation of volatile components from rocks under mechanical loading as the source of hydrogeochemical anomalies preceding earthquakes [J]. *Pure and Applied Geophysics* ,1984 ,122( 2/4) : 463–477
- [22] 梁收运 谌文武 韩文峰 等. 断层泥吸附气体特征与断层活动性关系初步研究 [J]. *兰州大学学报( 自然科学版)* ,2006 ,42( 1) : 23–26
- [23] 许志琴 李海兵 吴忠良. 汶川地震和科学钻探 [J]. *地质学报* ,2008 ,82( 12) : 1613–1622
- [24] Li H ,Wang H ,Xu Z ,et al. Characteristics of the fault-related rocks ,fault zones and the principal slip zone in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 ( WFSD-1) [J]. *Tectonophysics* ,2012 ,584: 23–42
- [25] 程鉴基. 汞断层气异常与活断层关系浅析 [J]. *地壳形变与地震* ,1997 ,17( 2) : 97–100
- [26] 迟清华. 汞在地壳、岩石和疏松沉积物中的分布 [J]. *地球化学* ,2004 ,33( 6) : 641–648
- [27] 刘英俊 曹励明 李兆麟 等. 元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社 ,1984: 338
- [28] 王基华 王亮 孙凤民 等. 隐伏断层性状的汞地球化学标志研究 [J]. *中国地震* ,1994 ,10( 2) : 112–122
- [29] 金仰芬 伍宗华 黄宏库 等. 汞测量监测预报地震的前景 [J]. *地震* ,1987 ,7( 5) : 6–11
- [30] 魏家珍 申春生. 汞测量用于地震预报研究实例剖析 [J]. *物探与化探* ,1992 ,16( 3) : 216–222
- [31] Fursov V Z ,Vol'fson N B ,Khalvol'skiy A G. Results of a study of mercury vapor in the Tashkent earthquake zone [J]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* ,1968 ,179: 208–210
- [32] 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[J]. *Geochemical Transactions* 2010 ,11( 1) : 5 ,DOI: 10.1186/1467-4866-11-5
- [33] 李莹 杜建国 王富宽 等. 延怀盆地土壤气体地球化学特征[J]. *地震学报* 2009 ,31( 1) : 82-91
- [34] Klusman R W ,Jaacks J A. Environmental influences upon mercury ,radon and helium concentrations in soil gases at a site near Denver , Colorado[J]. *Journal of Geochemical Exploration* ,1987 ,27( 3) : 259-280
- [35] 陶淑芬 王长岭 刘耀炜 等. 土壤气干扰因素初步实验研究[J]. *西北地震学报* ,1992 ,14( 1) : 92-95
- [36] 车用太 鱼金子. 地震地下流体力学[M]. 北京: 气象出版社 2006: 320-321
- [37] Bagnato E ,Aiuppa A ,Parello F ,et al. Mercury concentration ,speciation and budget in volcanic aquifers: Italy and Guadeloupe ( Lesser Antilles) [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 2009 ,179( 1) : 96-106
- [38] Johannesson K H ,Neumann K. Geochemical cycling of mercury in a deep ,confined aquifer: Insights from biogeochemical reactive transport modeling[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2013 ,106: 25-43
- [39] Wiederhold J G ,Cramer C J ,Daniel K ,et al. Equilibrium mercury isotope fractionation between dissolved Hg ( II) species and thiol-bound Hg[J]. *Environmental Science & Technology* 2010 ,44( 11) : 4191-4197
- [40] Zheng W ,Foucher D ,Hintelmann H. Mercury isotope fractionation during volatilization of Hg ( 0) from solution into the gas phase[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 2007 ,22( 9) : 1097-1104
- [41] Estrade N ,Carignan J ,Sonke J E ,et al. Mercury isotope fractionation during liquid-vapor evaporation experiments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2009 ,73( 10) : 2693-2711
- [42] Bergquist B A ,Blum J D. Mass-dependent and-independent fractionation of Hg isotopes by photoreduction in aquatic systems[J]. *Science* , 2007 ,318( 5849) : 417-420
- [43] Kritee K ,Blum J D ,Johnson M W ,et al. Mercury stable isotope fractionation during reduction of Hg ( II) to Hg ( 0) by mercury resistant microorganisms[J]. *Environmental Science & Technology* 2007 ,41( 6) : 1889-1895
- [44] Rodríguez-González P ,Epov V N ,Bridou R ,et al. Species-specific stable isotope fractionation of mercury during Hg ( II) methylation by an anaerobic bacteria ( *Desulfobulbus propionicus*) under dark conditions [J]. *Environmental science & technology* ,2009 ,43( 24) : 9183-9188
- [45] 阴永光 李雁宾 蔡勇 等. 汞的环境光化学[J]. *环境化学* 2011 ,30( 1) : 84-91
- [46] Smith C N ,Kesler S E ,Klaue B ,et al. Mercury isotope fractionation in fossil hydrothermal systems[J]. *Geology* 2005 ,33( 10) : 825-828
- [47] Smith C N ,Kesler S E ,Blum J D ,et al. Isotope geochemistry of mercury in source rocks ,mineral deposits and spring deposits of the California Coast Ranges ,USA[J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2008 ,269( 3) : 399-407
- [48] Zambardi T ,Sonke J ,Toutain J ,et al. Mercury emissions and stable isotopic compositions at Vulcano Island ( Italy) [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2009 ,277( 1) : 236-243
- [49] Sherman L ,Blum J ,Nordstrom D ,et al. Mercury isotopic composition of hydrothermal systems in the Yellowstone Plateau volcanic field and Guaymas Basin sea-floor rift[J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2009 ,279( 1) : 86-96
- [50] 尹润生 冯新斌 ,Delphine F ,等. 多接收电感耦合等离子体质谱法高精度测定汞同位素组成[J]. *分析化学* ,2010 ,38( 7) : 929-934
- [51] Feng X ,Foucher D ,Hintelmann H ,et al. Tracing mercury contamination sources in sediments using mercury isotope compositions [J]. *Environmental science & technology* 2010 ,44( 9) : 3363-3368
- [52] 侍文芳 冯新斌 张干 等. 150 年以来红原雨养型泥炭中高分辨的汞同位素沉积记录[J]. *科学通报* 2011 ,56( 8) : 583-588
- [53] Foucher D ,Hintelmann H. Tracing mercury contamination from the Idrija mining region ( Slovenia) to the Gulf of Trieste using Hg isotope ratio measurements[J]. *Environmental Science & Technology* 2008 ,43( 1) : 33-39
- [54] Bergquist B A ,Blum J D. The odds and evens of mercury isotopes: Applications of mass-dependent and mass-independent isotope fractionation[J]. *Elements* 2009 ,5( 6) : 353-357
- [55] Estrade N ,Carignan J ,Donard O F. Tracing and quantifying anthropogenic mercury sources in soils of northern France using isotopic signatures[J]. *Environmental Science & Technology* 2011 ,45( 4) : 1235-1242
- [56] Liu J ,Feng X ,Yin R ,et al. Mercury distributions and mercury isotope signatures in sediments of Dongjiang ,the Pearl River Delta ,China [J]. *Chemical Geology* 2011 ,287( 1) : 81-89
- [57] Yin R ,Feng X ,Wang J ,et al. Mercury speciation and mercury isotope fractionation during ore roasting process and their implication to source identification of downstream sediment in the Wanshan mercury mining area ,SW China[J]. *Chemical Geology* 2013 ,336: 72-79
- [58] Yin R ,Feng X ,Wang J ,et al. Mercury isotope variations between bioavailable mercury fractions and total mercury in mercury contaminated soil in Wanshan Mercury Mine ,SW China[J]. *Chemical Geology* 2013 ,336: 80-86

- [59] Yin R ,Feng X ,Meng B. Stable mercury isotope variation in rice plants ( *Oryza sativa* L.) from the Wanshan mercury mining district ,SW China[J]. Environmental Science & Technology ,2013 ,47( 5) :2238-2245
- [60] Yin R ,Feng X ,Li X ,et al. Trends and advances in mercury stable isotopes as a geochemical tracer[J]. Trends in Environmental Analytical Chemistry ,2014 ,2: 1-10
- [61] 王柱红 ,陈玖斌 ,冯新斌 ,等. Hg 稳定同位素地球化学研究进展[J]. 地球与环境 ,2012 ,40( 004) :599-610
- [62] Blum J D ,Sherman L S ,Johnson M W. Mercury isotopes in earth and environmental sciences [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences ,2014 ,42: 249-269
- [63] Nesbitt B E ,Muehlenbachs K ,Murowchick J B. Genetic implications of stable isotope characteristics of mesothermal Au deposits and related Sb and Hg deposits in the Canadian Cordillera[J]. Economic Geology ,1989 ,84( 6) :1489-1506
- [64] 中国地震局监测预报司. 地震地下流体理论基础与观测技术[M]. 北京:地震出版社 ,2007: 156
- [65] King C Y. Gas geochemistry applied to earthquake prediction: An overview [J]. Journal of Geophysical Research ,1986 ,91( B12) :12269-12281
- [66] 魏家珍 ,申春生. 首都圈地区汞测量典型震例剖析及其映震效能评价[J]. 地震 ,1994 ,3( 3) :44-49
- [67] 张炜 ,申春生 ,邢玉安 ,等. 地震短临异常新指标的探索——汞浓度探测[J]. 中国地震 ,1989 ,5( 4) :13-19
- [68] 魏柏林 ,薛佳谋 ,李富光 ,等. 从测定壤中的气汞量来研究活断层[J]. 地震地质 ,1988 ,10( 2) :88-92
- [69] 张建伟 ,赵全升 ,郭秀岩 ,等. 聊城-兰考断裂及其土壤汞、氡气异常[J]. 中国地质 ,2010 ,37( 5) :1419-1425
- [70] 刘菁华 ,王祝文 ,刘树田 ,等. 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) ,2006 ,36( 2) :295-304
- [71] 刘树田 ,邓金宪. 活动断裂带的壤中气汞量测量研究[J]. 地质论评 ,1998 ,44( 5) :547-552
- [72] 张慧 ,张新基 ,苏鹤军 ,等. 金城关活动断裂带土壤气汞、汞地球化学特征[J]. 西北地震学报 ,2005 ,27( 2) :150-153
- [73] Wang G ,Liu C ,Wang J ,et al. The use of soil mercury and radon gas surveys to assist the detection of concealed faults in Fuzhou City ,China [J]. Environmental Geology ,2006 ,51( 1) :83-90
- [74] 陈华静 ,申春生 ,来淑琴. 汞测量过程中干扰因素的探讨[J]. 地震 ,1999 ,19( 3) :291-296
- [75] 陈玉红 ,米健秋 ,张兰. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用测定环境水样中的二价汞、甲基汞、乙基汞与苯基汞[J]. 环境化学 ,2011 ,30( 4) :893-896
- [76] 王梅 ,龙军标 ,杨冰仪 ,等. 微波消解-原子荧光法测定染毒小鼠体内汞的分布[J]. 环境化学 ,2013 ,32( 5) :893-897
- [77] 孙阳昭 ,陈扬 ,蓝虹 ,等. 中国汞污染的来源、成因及控制技术路径分析[J]. 环境化学 ,2013 ,32( 6) :937-942