

断层气中氢的检测及其解释

Randolph H. Ware, Christian Roecken, Max Wyss

摘要

在地壳岩石中,由于化学的和机械的变化可释放氢气。氢一经释放,就非常容易迁移,有浮力,而且几乎不溶于地下水。一个断层系可充作通道,使氢在它的地表显示附近的土壤气中聚集。因环境大气中缺乏氢,它在土壤气中以高水平出现,可作为断层测绘的手段。为了评价这一手段,我们调查了11个不同断层,在每一断层附近采集了2至21个土壤气样,测量了氢和甲烷的浓度。其中,4个断层的活动方向是正向的(美国西部、希腊),5个是平移或倾滑的(加利福尼亚,科罗拉多,日本),两个是逆向的(加利福尼亚)。在其中的4个断层(希伯津湖、黄石、山崎、巴勒山)上,最高氢浓度范围从80ppm到70%,甲烷从300ppm到5%。除了一个取自爱达荷,鲍惹奇山的样品有2%甲烷外,所有其它测点的两种气体只有背景水平。据此初步研究,尚难了解氢的出现与断层位置是唯一相关,还是出于偶然。产生和聚集氢所需要的条件也不清楚。过量的氢完全可能在不同地质情况下由不同机理产生。例如,局部岩石里有氢氧化亚铁,它可起化学反应产生氢。为了阐明氢和构造断层活动之间的关系需要进行广泛的、详细的研究。

引言

普遍用于识别活动断层的方法包括坑探、地质测绘、微震活动的地震观察以及大地测量技术。最近在日本的调查发现,与活动断层地表迹线位置有关的土壤气中含高浓度氢,据此提出了一项新的探测活动断层的地球化学方法(Wakita等,1980)。在美国,已在几个活动断层上连续监测氢气,结果表明,氢的释放有时是地震前兆(Sato等,1983; Mcgee等,1983)。

Wakita等人最先报导了断层气中的氢(1980)。他们发现,山崎断层附近氢水平很高,按体积计算达3%,而远离该断层的环境大气中只接近0.5ppm。总计有70个取样点用于他们的研究,全部样品都显示了相同的分类特征。此后,在断层上采集土壤气体进行调

(上接56页)

原题: Impulsive Radon Emanation on a Creeping Segment of the san Andreas Fault California

(河北省地震局王运启、刘允清译;冯玮校;俞福源审)

查, 揭示了氢水平比环境大气高 5 个数量级(Sugisaki等, 1982)。尽管报导过氢水平随时间的变动范围很宽, 而Sugisaki等(1982), 在近1500年内一直活动的断层上却发现了最高水平的氢。

在美国, 为了连续测氢, 最近于加利福尼亚的主要断层上安装了燃料电池检测器(Sato和Mcgee, 1982)。沿圣安德烈斯断层和卡拉维尔斯断层有 9 个检测器在工(Sato等, 1983), 在卡尔蒂奇的凯洛格放射性实验室, 于1982年初, 在克莱斯地震台以及帕科伊玛·达姆附近都开始应用检测器。从1982年5月起, 在卡尔德拉长谷的两台检测器也处于工作状态(Mcgee等, 1982)。所有这些测点均表明氢日变量为10ppm, 而在非经常的排气事件中达100ppn。距测点约25公里范围内的地震前, 看来是有异常峰值的(Sato等, 1983)。Mcgee等(1983)提出, 水和岩浆或岩石中的FeO反应、可能产生氢气, 岩浆或构造活动使深部岩石破裂时, 也可能释放被封闭的氢。

氢还作为吸留气存在, 当火成岩、变质岩或沉积岩破裂时有可能被释放(Giardini等, 1976; Jiang和Li, 1981), 从而使Giardini等提出氢可作为应力变化的标志。Kita等(1982)提出氢释放的另一可能原因是刚压碎的岩石和水之间的表面反应。他们从25到270°C, 于各种温度条件下进行了石英和花岗岩的压碎实验, 发现了氢的产生, 其产量随温度上升而增加。

Kita等(1980)测量了山崎断层附近几个断层气样品的 δD , 随后计算了产生这些同位素数据所需要的分离温度。他们采用每百米2°C或3°C的地温梯度, 确定了产生这些同位素所需要的反应深度并认为该反应深度一般符合于当地微震的深度范围。据此, 他们提出土壤气中氢的 δD 值取决于地震活动新揭露的岩石表面与地下水发生反应的深度。

正如Cold和Soter(1980)所提出的, 产于地球深部的非生源甲烷是另一种氢源。可以设想一些断层能为甲烷和由它离解出来的氢开辟通向地表的途径并使之在土壤气中聚集。

要用氢作断层标志, 了解氢释放机理和有关氢发生的地质背景问题, 是很重要的。我们已开始断层调查, 应用采集和分析技术测量土壤气中的氢(附带甲烷)。以下, 我们讨论这一技术和调查结果。

采样和检测技术

为了研究土壤气中高水平氢的存在与否和断层以及地质特征之间的关系, 在若干不同地质单元的断层上采集了样品。对于每个测点都挑选了易接近或尽可能接近断层露头的采样位置, 还寻找了便于挖掘的松散土壤。在每一有代表性的位置上用镐和铲挖出土壤和石头, 掘成一个深约50厘米的坑, 将一长20厘米、直径10厘米、用普通聚氯乙烯排水管制成的开口筒垂直放入坑内, 筒的顶端加盖。然后夯实筒周围的松散土壤, 使之粗略密封。土壤气通过筒下面的开口向筒内扩散。筒盖有一个带氟丁二烯橡胶隔膜的黄铜接头。经数小时或更长的时间(在这段时间里, 使筒内气体与土壤气接近平衡)之后, 用一支5毫升带阀门的气体注射器穿透隔膜, 从筒内抽出气体。用该注

射器将气体送到实验室，注入气相色谱进行分析。

含100ppm氢的标准样品在气体注射器中保存一个月，然后分析由于扩散，泄漏或其它影响，使氢浓度可能产生的变化。所观察的10个样品中，最大变化值为~20%，既然大多数野外采集的样品，于分析前，在注射器中仅保留几天，因此用注射器转移和运送样品是适当的。我们注意到，因随意安放采集筒或因断层气中氢水平随时间的变化，氢的可变性都是不可避免的。我们的目的是识别高水平氢的存在范围，而氢的精确测量要受采集部位的偶然性和采样时间的限制。

我们使用了灵敏的电子捕获检测器气相色谱仪(GC)进行分析(Sievers等,1979, Philips等,1979)。这个装置能测量环境大气中的氢(0.5ppm)和甲烷(1ppm)，

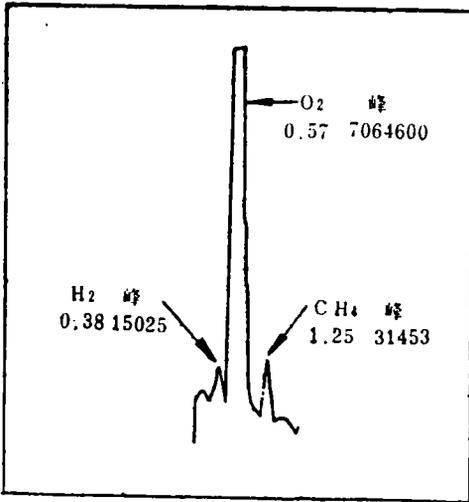


图1 0.1毫升环境大气样品的气相色谱分析，用灵敏的电子捕获检测器，峰顶时间用分表示，用任意单位的峰面积指明氢、氧、甲烷的峰值。

用0.1毫升样品，时间少于2分，精度达20%。用较大的气样量能达到更高的精度，但GC要求较长的恢复时间。环境大气，瓶装环境大气，商业制备标准（接近10ppm H₂和100ppm CH₄），以及用稀释瓶装氢制备的标准（500ppm）都常用于GC的标定。图1表示环境大气样品的典型分析，清晰地分辨出H₂、O₂和CH₄的色谱峰。为了避免氢峰和氧峰的重迭并考虑到缩短分析时间，精选了色谱柱长度，温度，载气流速和其它GC操作参量。色谱峰面积被自动积分。从0.5到500ppm范围内的氢值，其GC响应是线性的。对浓度较高的样品可先稀释，而后在检测器的线性范围内测量。

野外调查

调查包括断层类别和地质背景。对切断各种沉积岩、变质岩和火成岩的平移断层，逆断层和正断层进行了典型调查，涉及到很新的直至古老的断层，同时还注意到它们的最近活动。该调查结果概括于表1。在美国的采样点位置表示在图2和图3上。以下还分组讨论了这些断层，其中包括高水平氢或甲烷的断层以及与环境大气水平相同的断层。

高水平的H₂或CH₄

中加利福尼亚，巴勒山断层。在1983年7月，从采集气泡的筒内取了4个样品，这些气泡来源于整个地区静止浅水下的裂隙，在该地区有平移断层穿过巴勒溪(图3)。当气泡冒出水面时，我们用香烟打火机试验确定为可燃气体。经实验室定量分析，确定氢浓度为70%，甲烷浓度为5%。W.C.Evans(USGS)独立采样分析，验证了这一结果。Carol Kendall(USGS)用质谱仪确定了氢同位素比值： $\delta D = -690\%$ (SMOW)，误差为

土 5%。Michael Burns (USGS) 还对巴勒山断层带流出的水和巴勒溪附近的水测定了 δD 和 $\delta^{18}O$ 。这些数值与本地大气水的数值一致。巴勒溪水的氢同位素比值与所估计的, 于地下几公里温度下水的离解相对应 (Evans, 1984)。

表 1 各类断层土壤气中氢和甲烷的水平

断层名称和(或)位置	断层类型	最近活动时间	局部地质	样品数	最高 H ₂ 水平	最高 CH ₄ 水平
中加利福尼亚, 圣安德烈斯	平移断层	现在滑动	粘土和砂质土壤	21	0.5ppm	1 ppm
南加利福尼亚, 圣安德烈斯	平移断层	1857年	破碎花岗岩	5	0.5ppm	1 ppm
南加利福尼亚, 旧金山	逆断层	1971年	粘土和分解的花岗岩	3	0.5ppm	1 ppm
中加利福尼亚, 科林加	逆断层	1983年	粘土和砂质土壤	2	0.5ppm	1 ppm
中加利福尼亚, 巴勒山	平移断层	不详	纯橄榄岩	4	70%	5%
科罗拉多断层	垂直倾向滑动断层, 平移断层	不详	花岗岩、片岩和沉积岩	12	0.5ppm	1 ppm
爱达荷, 鲍慈奇山	正断层	1983年	沉积岩和冲积物	15	0.5ppm	2%
蒙大拿, 希伯津湖	正断层	1959年	花岗岩, 冲积物和灰岩	6	80ppm	300ppm
怀俄明, 黄石	正断层	不详	流纹岩和火山凝灰岩	7	230ppm	1%
日本, 山崎	平移断层	现在滑动	花岗岩, 页岩和流纹岩	17	320ppm	1%
希腊, 科林斯	正断层	1981年	灰岩和沉积岩	6	0.5ppm	1 ppm

然而, 一个有希望的高浓度氢源可能存在于巴勒山断层周围, 主要由纯橄榄岩组成的岩石中。Barnes 等 (1972) 假定, 岩石中伴生的氢氧化亚铁, 按反应式 $3Fe(OH)_2 = Fe_3O_4 + H_2 + 2H_2O$ 逐渐转化成氢和磁铁矿, 是巴勒溪泡状气体的来源。

蒙大拿, 希伯津湖。于1983年10月, 在与1959年地震 ($M = 7.1$, 图2) 有关正断层上取了6个样品, 在希伯津断层一个3米高的悬崖上, 于前寒武纪花岗岩里取了4个样品。其中, 一个样品有高水平的氢和甲烷 (80和20ppm), 一个样品有高水平甲烷 (300ppm)。在红色峡谷断层一个4米高的悬崖上 (此处断层切穿了密西西比石灰岩和更新世冲积层), 取了两个样品, 其中一个样品有15ppm的氢。

爱达荷, 鲍慈奇山。在1983年10月28日地震 ($M_s = 6.2$, 图2) 后一天, 在一个3米高, 切穿第四纪冲积层的新的断层悬崖上, 采集了15个样品。冲积层下面的基岩是古生代沉积岩。这次地震沿干河区正断层 (向西倾斜 75° , 断距1.3到1.8公里) 发生。没有一个样品显示出高氢水平。4个样品的甲烷水平超过背景值数倍, 一个样品含2%甲烷。在地壳沉积岩中经常发现有机成因的甲烷, 它的存在并不出人意外; 然而, 缺少高

怀俄明，黄石国家公园。于1983年10月，在切穿流纹岩和其它火山凝灰岩的断层附近采集了7个样品，这些岩石由于该地区的热液活动而强烈蚀变（图2）。从绿柱石泉附近的沙中所采集的土壤气单样有230ppm的氢水平，从间歇泉纪念碑洼地采集的土壤气单样有200ppm，在这个洼地里，高出地面1米的环境大气中所取的对比单样有90ppm，表明这个地区普遍存在高水平氢。这里提到的其它测点附近也都采集了环境大气标准或对比样，但没有一个有高水平氢。

日本西南，山崎断层。在1983年11月，沿活动平移断层的三个测位上，采集了17个样品。以古生代花岗岩为主的基底岩石被厚不及数米的沉积层复盖。地表形迹以蚀变页岩和白垩纪酸性岩侵入体，如流纹岩岩脉为特征（Wakita等，1980）。取自两个测点的8个样品均有高水平氢达3000ppm。这些测点包括了Wakita等（1980）报导过的，具有高浓度氢的一部分测点。1983年秋，Wakita带领一位作者到这些测点去采集样品。他全部采集双样并亲自做了分析，获得了基本一致的结果（Wakita, 1984）。距山崎主断层迹约50到200米，于提取样品前，在中午前后，将气体取样器放置在适当位置上4个小时。

环境水平的 H_2 和 CH_4

中加利福尼亚，圣安德烈断层 1983年1月，从帕克费尔德延伸至圣胡安包蒂斯塔（图3）的平移断层带内，于粘土和砂质土壤中采集了21个样品。土壤气从聚氯乙烯筒内取出，这些筒原是为检测断层上的氦而安装的（King, 1980）。

中加利福尼亚，科林加。在1983年5月2日的地震震中附近（图3），从粘土和砂质土壤的地表裂缝取了两个样品。该样品采于 $M_s=6.5$ 事件后两天。

南加利福尼亚，旧金山断层。在1983年1月，沿1971年地震（ $M_s=6.5$ ，图3）的逆冲断层的地表断裂，从粘土和分解的花岗岩采集了3个样品。

南加利福尼亚，圣安德烈斯断层。于1983年6月，在靠近大松树的苹果园附近（图3），采集了5个样品。集气筒埋在平移断层活动压碎的粉状花岗岩里。这是¹857年特茹恩断层地震（估计 $M_s=8$ ）的地表断裂部位。

科罗拉多断层。在1983年7月，沿落基山麓的4条断层，采集了12个样品。其最近的断层活动估计在拉拉米形变期间已经发生。在下列4条断层中各取了3个样品。

1、前寒武系深砾湾花岗闪长岩中的麦克斯韦断层，一个近垂直的断层，具有倾向滑动位移。

2、前寒武系银羽状花岗岩中的石河断层，滑动方向不定，断面垂直。

3、前寒武系云母片岩，英云闪长岩侵入体以及宾夕法尼亚系喷泉地层红色页岩和长石砂岩中的绿岭断层；在一个近垂直断面上有倾向滑动位移。

4、二迭系阿鸟尔峡谷地层红色砂岩和粉砂岩中的卡特湖断层，有最近的平移位移。

希腊。在1983年8月，从1981年科林斯地震的地面破裂中采集了6个样品，该地面破裂与斯基纳以东约3公里的海岸相交。这个地震发生在1981年3月， $M_s=6.8$ 。它在本测点产生了1.2米的地面位错。有一个正断层使南面形成险峻山脉的石灰岩和北面的第四系沉积，并置交接。而气体收集筒就埋在由石灰岩碎块（相当于5厘米大小）和土

壤组成的松散岩屑中。

讨 论

如果土壤气中的高水平氢与断层的地表迹线位置有关，于深部必存在氢源，而断层必为通道。如前所述，已提出了几个氢源。一个（纯机械的）是从断层活动所压碎的岩石中释放吸留氢。另一个是化学的，涉及断层活动新揭露的岩石表面，该表面与地下水反应，或作为地下水离解的触媒。第三个，涉及水与岩浆和岩石中 FeO 的化学反应以及由于断层活动从破裂岩石中机械地释放封闭氢。第四个是深源的，在地幔中产生氢和甲烷。

就巴勒山发生的高浓度氢而言，我们论证了上述氢源没有一个是适当的。我们提出，这里的氢产于局部岩石中氢氧化亚铁的离解，而局部平移断层使氢向地表扩散，作为巴勒溪的泡状气体予以收集。

希伯津湖的高水平氢发现于红色峡谷断层。象该名称所启示的那样，测点的砂岩为红色并含有氧化铁。在该地区氧化铁与地下水反应是一个可能的氢源。

从爱达荷，鲍慈奇山地震的地面破裂所采集的土壤气样品不存在高水平氢，意味着在破裂的冲积层和沉积岩中，氢的机械释放微不足道。此外，从地下水或其它气源释放氢的过程中，新鲜岩石表面的直接反应或催化作用均不足以提高地面上氢的背景水平。从该测点未来样品的采集、分析可能确定氢长期释放的限度。与之相似，在希腊的科林斯，在新近活动断层上，取自沉积岩的样品也有一个否定的结果。在这些断层上完全可能不产生氢。

对于加利福尼亚的主要活动断层，包括圣胡安蒂斯塔南部，圣安德烈斯断层当前还在滑动的部分（其南部从1857年大地震后已经闭锁）以及1971年断裂的旧金山逆断层都没有发现高水平氢。这可能是由于粘土和断层泥的堵塞，这些地区的断层不能作为通道，或多半不存在氢源。然而无论在哪一种情况下，其检测结果都和日本山崎平移断层的检测结果相反，在那里，高水平氢普遍存在。

对于科罗拉多非活动断层，在沉积物和前寒武纪变质岩中均未发现高水平氢。这样的断层不再作为通道，涉及新鲜表面或机械释放的气源不复存在，这样的假定是合涵的。

对于黄石地热活动区，热液地质是很复杂的，而采集的样品数量却是有限的。在局部环境大气中高水平氢的出现，可能是由于间歇泉，喷气孔或其它地热过程的大量排气。就这样的间歇泉和喷气孔与活动断层位置的相互关系而言，氢确实可作为断层标志，但这些热效应的存在，其它断层测绘手段就没有必要了。

结 论

我们据此初步调查得出结论，氢只在某些断层的土壤气中以高水平存在。在断层附近采集的样品是否比任意选择取样点更能含有高水平氢，在当前还不清楚。本次调查不

（下转第30页）

讨 论

在圣哈辛托断裂带的Coyote蠕动段附近的废弃水井中,记录到了水位向上和向下的异常脉冲,异常的持续时间小于1天。这个时间比Johnson等(1974)和Mortensen等(1977)报导的在数日内测到的与蠕动事件相关的水位变化的时间要短,异常的形态更尖锐。在短时间内出现的这些脉冲,其形态与Lippincott等(1983)报导的,被认为是与蠕动事件有关的那些脉冲是相似的。与蠕动事件相关的水位变化随地质条件、井孔特征以及事件性质的不同而不同,所以异常的差异是不足为奇的。

近乎瞬时的垂线型的异常和高频的波动,如图6所示,可以用气体从井孔中冒出来解释。在能观测到气体冒出井孔的圣哈辛托谷地(7N1井附近,图1)的另一个井的Stevens记录器记录到了类似的反映。在其后三周发生的4.5级地震与圣哈辛托断裂带的海滨段没有明显的联系(图1),而且也没有关于蠕动事件的其它证据。胁田宏(1982)已指出了若干地震的气体喷发前兆,不过强风也能用来解释水位的高频波动(Todd, 1980)。

由于水位异常仅仅在三个中强地震($M=4.5-5.5$)中的两个地震前在一两个井中观测到,我们推测,这些可能的预兆接近于我们井孔能探测的极限。虽然这里报导的水位异常尚不能充分地证明水位观测对地震预报的重要性,但我们的结果表明,能记录到固体潮的井也能记录到可能的蠕动事件,包括发生在一个5.5级地震前的事件在内。

原题: Possible Strain Events Reflected in Water Levels in Wells along San Jacinto
Fault Zone, Southern California
(河北省地震局 万迪堃译;周清良校,俞福源审)

(上接第62页)

够广泛,还不足以清晰鉴别断层类型和地质背景的组合,这一组合可提供有关氢源和氢释放的机理,而这又是推断氢作为可靠断层标志所必需的。为了确定氢作为断层测绘手段的价值,需要补充基础研究。

原题: The Detection and Interpretation of Hydrogen in Fault Gases
(河北省地震局 冯玮译;许智校,俞福源审)