

# 美国加州主要断裂带氦气测量\*

张 炜

金继宇

(中国北京 100036 国家地震局分析预报中心)

(美国加州门罗帕克 CA94025 地质调查所)

## 摘 要

通过对美国加州圣安德列斯等主要活动断层上方土壤中逸出气氦的观测,获取了不同构造活动类型断层的开启段、闭锁段、蠕滑段上方土壤中氦气沿断层逸出随空间变化的丰富资料.讨论了逸出氦的变化特征以及断层气研究在地震预报研究中的作用等问题.

**关键词** 土壤气; 逸出氦气; 蠕滑断层

## 1 引 言

美国加州圣安德列斯等断层是当今世界上活动十分强烈的大型走滑断层,该断裂带全长约 1300 km,宽 100 km.地震资料表明,该断裂带地震活动频度高、强度大.1857 年和 1906 年曾发生过两次 8 级以上大地震.近几年来,该带上地震活动频繁,1989 年 10 月 18 日在加州的圣克鲁斯(Santa Cruz)南山区发生了 7.1 级的 Loma Prieta 地震,1992 年 6 月 28 日在南加州的 Landers 又发生了 7.5 级地震.

地震的发生是一个十分复杂的力学-物理-化学过程.迄今为止,人们已认识到在地壳的浅部,地震发生的最重要原因是断层的大规模滑动,而地下温度、有效围压、孔隙流体化学和岩石类型是决定是否能够引起大型滑动的重要变量.其中地震的流体化学效应是当今地震成因研究中的最薄弱环节.由于地震的发生与断层活动有着十分密切的关系,因此,我们选择了现今构造活动十分强烈的圣安德列斯断裂带,研究活动断层及其附近地区地下流体沿断裂带逸出的特征.

## 2 观测方法和测试仪器

在活动断裂上方,开展气体地球化学研究已广泛引起国内外科学界的重视,赋存于岩石中的气体,可以通过断层的破碎带从地下深处向地表迁移.因此,研究断裂带上方土壤气体的变化,可以了解地下气体的运移状况及断层的活动性(张炜等,1988).

在美国加州选择了不同构造活动类型的活动断层,并在断层的上方布设了跨断层和沿断层的测线,进行土壤气氦的观测.由于氦是放射性铀系列中唯一的气体元素,是惰性

\* 1993 年 1 月 12 日收到初稿,1993 年 3 月 4 日决定采用.

气体,因而测试方法干扰小,但氦可被其它固体物质所吸附,以机械搬运或自身的对流扩散作用在通道良好的条件下进行迁移.因此,在构造破碎带上及其附近氦射气易于逸出.大量的观测实践已清楚地表明,在断裂带上,特别是活动断裂上方,可观测到氦的放射性异常.

测试仪器选择了我国上海电子仪器厂生产的一种新型的 FD-3017 瞬时测氦仪,测量土壤气中氦的短寿命子体  $\text{RaA} (^{218}\text{Po})$ ,通过测量  $\text{RaA}$  衰变时放出的  $\alpha$  粒子,即可得到氦的浓度.由于  $\text{RaA}$  的半衰期为 3.05 min,因此对探测器不会造成污染.使用该仪器可以快速地获取观测结果,并可及时进行复测.

### 3 观测剖面的选择和测量结果

断层活动有二种方式,一种是稳定滑动,称为断层蠕滑;另一种则为粘滑,即突然失稳.为了研究不同类型构造活动地段断裂带上方逸出气氦的变化特征,我们沿圣安德列斯断裂带选择了断层的开启段、断层闭锁段、断层蠕滑段进行跨断层的土壤气氦测量,现将观测结果分述如下:

#### 3.1 最新地震断层(断层开启段)土壤气氦测量结果

1992 年 6 月 28 日南加州洛杉矶东 Landers 发生了 7.5 级地震,震后 3 个星期,我们到达大震现场,在震中部位选择了地面有严重破坏,水平错动和垂直错动十分明显的地段,布设了测量剖面见图 1(Monastersky, 1992),图中的 1 为 Reche 测线,2 为 Encantado 测线(笔者结果).

##### 3.1.1 Reche 测线

在 Landers 7.5 级地震震中部位 Reche 地段垂直地震新形成的裂缝和沿裂缝带共测了 3 条剖面.

(1) 垂直断层测线.在近南北向的地震断层上,布设了一条跨断层的東西向测线,测点间距为 12 m,测线长度为 414 m.图 2a 给出了 Reche 测线土壤气氦的观测结果.由图可以看出,该地区氦值低,在 0—4 个脉冲范围内波动,但在地震新形成的二条断裂上方,氦值可达 25 和 27 个脉冲,异常十分突出.

(2) 沿裂缝测线.为了进一步证实裂缝带上氦出现高值异常,布设了二条南北向测线,测量结果见图 2b.由图可看出,裂缝上方氦值全部偏高,二条测线结果一致,最高测值可达 40 个脉冲.

##### 3.1.2 Encantado 测线

在 Reche 测线以北 1700 m 处,垂直地震断层布设了另一条跨新地震裂缝的测线和复

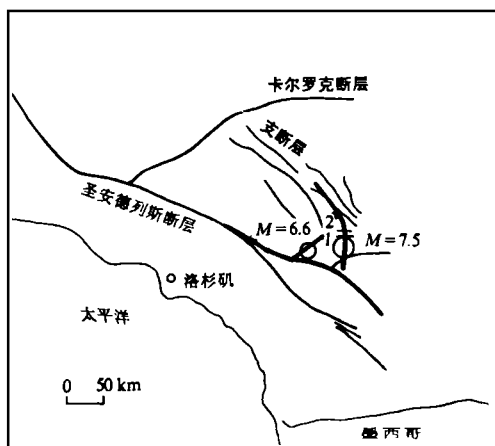


图 1 1992 年 Landers 7.5 级和 Big Bear 6.6 级地震震中位置及土壤气测线布设示意图

测线,测线长度 687 m,图 3 给出了 Encantado 土壤气氮主测线和复测线测量结果.由图可以看出,在无裂缝穿过的地区,氮值在 0—2 个脉冲范围内波动.在穿过地震裂缝的上方,氮值明显增大,高值可达 11 和 17 个脉冲成几倍和十几倍增长.二条测线的测量结果具有很好的一致性,异常形态相似,氮的高值全部出现在地震裂缝的上方.

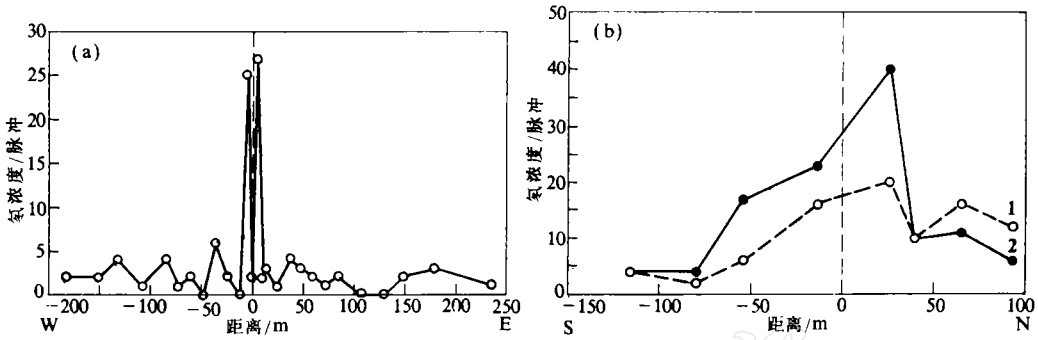


图 2 Reche 测线土壤氮测量曲线. (a)东西向测线; (b)南北向测线(1. 为东部测线, 2. 为西部测线)

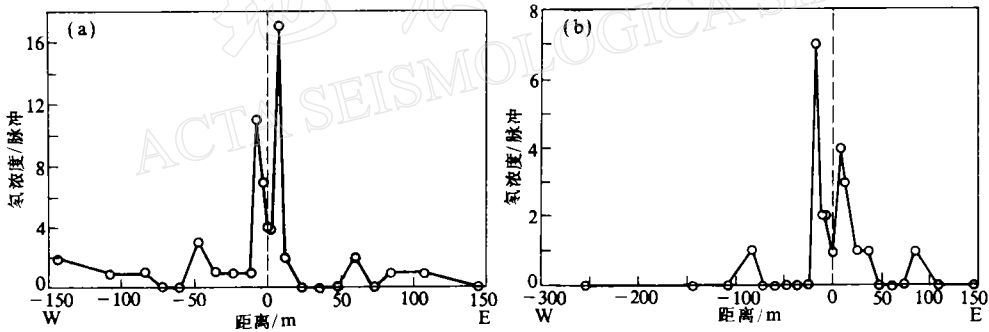


图 3 Encantado 测线土壤氮测量曲线. (a)主测线, (b)复测线

### 3.2 断层闭锁段土壤气氮测量结果

在 1906 年 4 月 18 日旧金山 8.3 级大震的震中部位( $37^{\circ}42'N, 122^{\circ}30'W$ ), 选择了一条横跨圣安德列斯断层的土壤气氮测量剖面. 图 4a 给出了 1906 年大震的震中位置、有感范围和破坏范围等. 由图可看出, 1906 年旧金山大地震圣安德列斯断层的破裂长度近 430 km(由北部的 Cape Mendocino 至南部的 San Juan Bautista 附近). 在 Olema 附近测量的最大位移量达 6 m(U. S. Geological Survey, 1989).

自 1906 年旧金山 8.3 级大地震至今已有 86 年, 据近些年来的地震资料, 在该次地震的破裂范围内地震活动平静, 因此可以认为, 该断层是一段闭锁段的断层, 尤其在 Olema 附近.

本次测量布设的跨断层测线位于 Olema, 全长 139.5 m, 共有测点 21 个, 结果显示于图 4b. 该地区土壤中氮气的背景值在 30—40 个脉冲范围内变化, 而在断裂带上方, 氮值

偏高,最高值可达 219 个脉冲,是正常值的 6—7 倍. 高值区分布在断层中线的两侧共 30 多米的宽度内,该宽度正好与 1906 年大震活动破裂带的宽度相吻合. 在此范围以外地区,氦值已恢复到正常值水平.

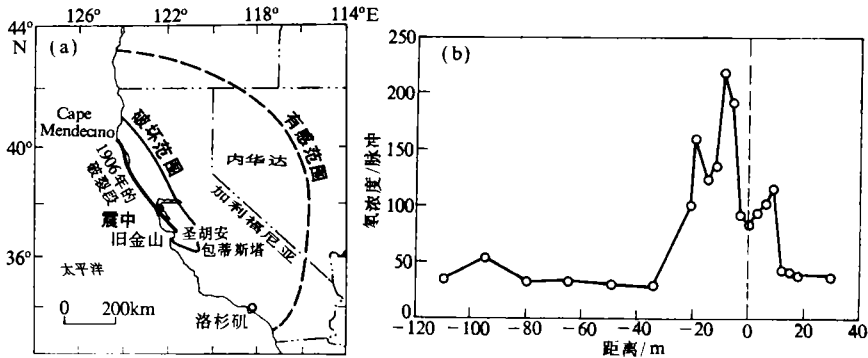


图 4 1906 年旧金山 8.3 级大震震中区及土壤氦测量曲线

(a) 1906 年大震震中位置、有感范围和破坏范围图; (b) 震中区土壤氦测量曲线

上述观测结果表明,在圣安德列斯断层上方,处于闭锁状态的地震断层破碎带上,仍然可观测到土壤氦的高值异常区.

### 3.3 断层蠕滑段土壤氦测量

在圣安德列斯断层及其支断层上,有断层的蠕滑现象. 此现象是 1960 年 Steinbrugge 等在 Hollister 附近的酿酒厂边首次注意到的. 此后在 1966 年由 Radbruch 等在 Hayward 断裂带上, Rogers 和 Nason 于 1968 年在 Calaveras 断层上又相继发现了这种构造蠕滑地段. 为了观测这种现象,自 1968 年开始,美国地质调查所在加州的一些主要断裂带上布设了蠕变仪观测网,目前共有 28 个观测点(6 个在 Hayward 断层上,10 个在 Calaveras 断层上,2 个在 Imperial 断层上,其余在圣安德列斯断层上).

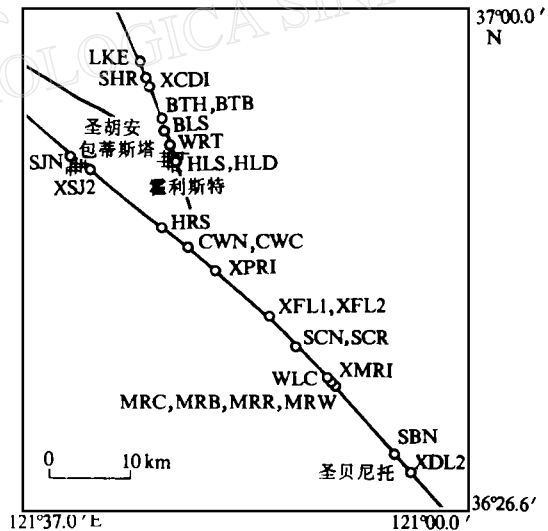


图 5 断层蠕滑段土壤氦测量剖面位置  
(阴影部分), 空圈为地质调查所蠕滑观测点

我们在圣安德列斯断层的 San Juan Bautista 附近和 Calaveras 断层的 Hollister 选择了二个蠕滑现象十分明显的地段,开展了跨断层的土壤氦气的测量(图 5)。

#### 3.3.1 Hollister(HLS)剖面

1970 年 4 月,在 Hollister 城中心附近安装了蠕变仪. 根据蠕变仪的测量结果,该地区

平均年蠕变率为 8 mm/a. 我们沿第 7 大街, 垂直 Calaveras 断层布设了长 407 m 的测线和一条长 150 m 的复测线, 共有观测点 81 个, 测点间距一般为 3 m. 图 6a 给出了该地段土壤气氮的观测结果. 由图可看出, 该地区土壤气氮背景值在 0—30 个脉冲范围内变化, 总体上看氮的高值出现在断裂带的上方, 但高值点不像以往文献中所指出的出现在断层的正上方, 而是在其两侧. 在断层的东盘距断层中线(图中 0 点处)39 m 观测到氮的最高值, 其测值可达 158 个脉冲, 而在断层中线(0 线部位)氮值仅为 58 个脉冲, 因此, 我们观测到了与以往断层气测量结果有些不同的异常现象. 由于断层蠕滑现象已达地表, 因此, 蠕滑段在地表很易判断, 通过对观测结果进行反复核实, 我们确认了这种异常形态.

### 3.3.2 Nyland(SJN)测线

该测线跨圣安德列斯断层, 位于 San Juan Bautista 西北 Nyland 牧场内. 该地段由于断层蠕滑使牧场内的围栏和车道出现明显的弯曲现象. 1968 年美国地质调查所在该处安装了蠕变仪, 年平均蠕变率为 8 mm/a. 测线布设在蠕变仪南 9 m 处, 测线中点与蠕变仪探头中点平行, 测线横跨蠕滑段, 测线长为 345 m. 图 6b 给出了该测线土壤气氮的观测结果. 由图可以看出, 在 Nyland 测线所获取的观测结果与 Hollister 蠕滑段所取得的结果一致, 土壤气氮的高值出现在断层中线两侧, 仅 Nyland 测线氮的高值点的间距小于 Hollister, 在该断层的西盘 27 m 处观测到氮的高值为 90 个脉冲, 断层东盘 9 m 氮的高值也达 90 个脉冲, 而正常背景值在该地区一般在 0—30 个脉冲范围内波动.

由 Hollister 和 Nyland 断层蠕滑段土壤气氮的测量结果可以看出, 总体上看, 在断层的破碎带上, 可观测到土壤氮的高值异常, 但异常的形态呈马鞍形, 即断层蠕滑剧烈的部位氮值相对较低, 而其两侧则明显偏高. 本次观测到的这种新的异常形态, 打破了以往的传统看法, 从而更清楚地勾划出了不同活动类型断层破碎带部位逸出气氮的分布特征.

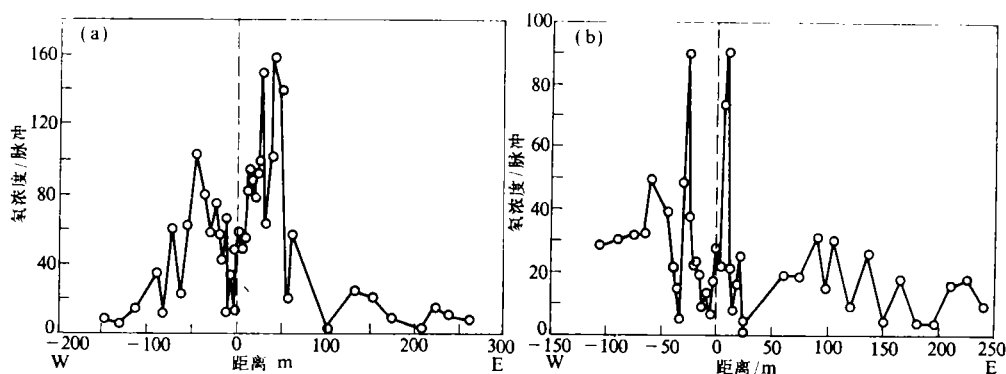


图 6 断层蠕滑段土壤气氮测量曲线. (a)Hollister 土壤氮测量曲线, (b)Nyland 土壤氮测量曲线

我们认为, 氮在蠕滑断层上的分布形态是由以下原因造成的: 其一, 由于断层已出露于地表, 断层蠕滑造成的地表破坏非常明显, 断层的走向十分清楚, 因而本次测量与国内开展的类似测量相比, 容易布设测线, 加之测点间距较密, 最小间距可达 1.5—3.0 m, 因而可以探测到土壤气氮随空间变化的细节; 其二, 由于断层长期蠕动, 使断层泥部分的土质变得致密而坚硬. 在测量过程中, 我们对测线上的土质条件、环境条件进行了认真的调

查,发现在相同的土质条件和环境条件下,蠕滑部分的土质致密,因而透气性要比相邻两侧差,所以出现了逸出氡低于两侧的结果。

## 4 几点认识

(1) 浅源构造地震,总是伴随着构造活动发生的,地震又大多发生在原已存在的活动断裂带上,因此本项研究选择在大型的圣安德列斯活动断裂带上,在不同的构造活动类型的地段,开展了断层气上方气体地球化学研究,获取了断层开启段、闭锁段、蠕滑段的土壤逸出气氡的观测结果。特别是对断层构造蠕滑段的土壤气氡的观测与研究,在国内外尚属首次。大量的现场观测表明,不论何种类型的构造活动,断裂带上方都是地壳具有良好的穿透性的地段,为地下流体向地表迁移提供了良好的通道,为监测来自地下的地震前兆信息提供了良好的前景(King, 1978; 张炜等, 1988)。

(2) 在断层气的测量过程中,由于测点间距小,因而获取了跨断层逸出氡在破碎带上方的空间变化特征。由于断层面被断层泥所充填,而断层泥部分的渗透性、透气性不如邻近两侧的破碎带高,因此,断层活动面上逸出氡的含量低于相邻两侧。这种特点,在蠕滑的断层上表现的更为突出。因此,在研究地下逸出氡在活动断裂带上随时间的变化规律、布设监测断层的流动测点以及研究其变化与地震的关系时,要考虑上述变化特征。

(3) 在不同类型的断裂带上所获取的土壤气氡测量资料表明,不论是近期有地震活动的断层开启段、近期无地震活动的历史上发生过大震的断层闭锁段、有蠕滑而无地震活动的蠕滑段,均在断裂带上方观测到氡的高值异常,因此,就不能简单地利用断裂带上方的氡值异常进行地震预报,而是要对断裂带上方土壤气氡进行长期的动态观测、布设定期定点观测点、研究土壤气氡随时间的变化规律和变化特征及其与地震的关系(张炜等, 1992)。

(4) 本项研究尚有许多问题,如测量过程中的干扰因素及排除方法、断层角砾岩的岩性特征对逸出氡的影响、一般构造运动与地震活动引起的地下流体异常的差异性等,都需要今后进一步深入探讨。

参加本项工作的还有张平、罗光伟,美国地质调查所王碧霞,意大利佛罗伦萨大学安杰罗、未尼萨列,在此一并表示致谢。

## 参 考 文 献

- 张炜、王吉易、鄂秀满、李宜瑚、王长岭、李正蒙, 1988. 水文地球化学预报地震的原理与方法, 250—251. 教育科学出版社, 北京.
- 张炜、史勇、张平, 1992. 地下水中逸出气氡的研究——水化地震前兆新项目探索. 中国地震, 8, 1, 18—25.
- King, C. Y., 1978. Radon emanation on San Andreas fault. *Nature*, 271, 516—519.
- Monastersky, R., 1992. Recent jolts boost Southern California's hazard. *Science News*, 142, 5, 72—74.
- U. S. Geological Survey, 1989. The San Andreas fault, California. *Professional Paper*, 1515, 159—161.