

马兴全, 王志铄, 孙杰, 李涛, 李源, 蔡颖哲, 夏修军, 赵显刚, 2017. 通过断层气氢探测新郑-太康断裂的浅层位置. 震灾防御技术, 12 (2): 354—362. doi: 10.11899/zzfy20170212

通过断层气氢探测新郑-太康断裂的 浅层位置¹

马兴全 王志铄 孙杰 李涛 李源
蔡颖哲 夏修军 赵显刚

(河南省地震局, 郑州 450016)

摘要 新郑-太康断裂隐伏于河南省东部平原下, 是一条规模较大的北西向断裂带, 曾于 2010 年发生太康 4.7 级地震, 确定该断裂准确的浅层位置对防震减灾具有重要意义。根据深部石油勘探资料, 应用德尔格 X-am 7000 型多气体检测仪, 在新郑地区布置 2 条与断裂走向近垂直的地球化学测线进行土壤氢气浓度测试, 结果发现解放路和马庄村-前宫村测线异常点位处氢气浓度分别为背景值的 16—33 倍和 40—50 倍。2 条 H₂ 浓度曲线同步解释出一条倾向变化、宽约 150m 的走滑断裂带, 位置与石油勘探资料吻合良好。此次研究表明利用断层气氢探测隐伏断裂的浅层位置在该区具有较好的可行性。

关键词: 新郑-太康断裂 地球化学探测 氢气 隐伏断裂 石油勘探资料

引言

中国大陆东部断裂系统是由一系列北东和北西走向断裂构成的共轭剪切破裂系统, 其中北西向断裂处于破裂初期, 活动性较强, 多断续, 集中成带分布并一定程度上控制着中强地震的发生(邵云惠, 1980; 李祖武, 1983; 冯希杰, 1988; 徐杰等, 2003)。针对该组断裂的研究成果将对防震减灾产生重要意义。由于平原区 NW 向断裂都是隐伏断裂, 所以对其具体位置尚需更深入的研究。通过测量断层气来探测隐伏断裂带已成为行之有效的方法之一, 目前已在多条隐伏断裂探测工作中取得了良好的效果(汪成民等, 1991; 陈刚等, 1995; 苏鹤军等, 2005; 刘菁华等, 2006; 邵永新等, 2007; 姚道平等, 2008; 刘学领等, 2011; 冯军等, 2011; 张慧等, 2013)。该方法将断裂视为天然地质体中连接深部与浅部的“通道”, 大量深部气体如 H₂、Rn 和 Hg 气等可经该通道向上逸出, 导致以上气体浓度在断裂位置附近异常升高, 利用该原理则可通过圈定断层气异常点位来探测断裂的空间位置。

1 基金项目 中国地震局“许昌-太康断层活动构造探测与地震危险性评价”与“朱夏、商丹断裂带气体强化监测技术研究”联合资助

[收稿日期] 2016-12-12

[作者简介] 马兴全, 男, 生于 1987 年。工程师。主要研究领域为构造地貌与活动构造。E-mail: 568046846@qq.com

[通讯作者] 王志铄, 男, 生于 1967 年。副研究员, 主要研究方向地球物理与地震预测。E-mail: 516494347@qq.com

研究区位于华北平原西部，区内第四系厚度达 150—300m 以上（河南省地质矿产局，1989）。新郑-太康断裂为一条北西向隐伏断裂（王志铄等，2017），由于缺乏系统的浅层地震勘探和钻孔资料，目前对其空间展布仍然存在争议。本次在利用石油勘探资料对新郑-太康断裂进行深部定位的基础上，在新郑地区布置 2 条与断层走向近垂直的地球化学测线，通过测量土壤中的 H_2 浓度并分析 H_2 分布特征，以确定该断裂的浅层位置。

1 区域地震地质背景

太康隆起西接豫西隆起，东邻鲁西隆起，南北分别为周口拗陷和开封拗陷。该区是豫西隆起与鲁西隆起延伸、连接的过渡单元，其基底以元古代五指岭组花岗片麻岩、黑云母片麻岩为主，上覆震旦系坚硬的安山玢岩（河南石油勘探指挥部地质大队，1976），进入新生代以来该区整体下沉并伴随强烈的断裂活动（石油化工部物探局，1975）。南部周口拗陷是第三系及上古生界的沉积拗陷，基底埋深约 3—6km，岩性以五指岭组片岩、嵩山组石英岩和登封杂岩为主（燃化部六四六厂研究所，1972）。其内部发育多条具有一定规模的北西向隐伏断裂（图 1），如登封-西华断裂（F4）和临颖-郸城断裂（F5），将周口拗陷切割为多个次级凹陷与凸起。

新郑-太康断裂（F1）起于新郑市北，向东经鄢陵，延伸至太康县以南，长 147km，是太康隆起和周口拗陷的分界断裂（图 1）。最新的深部石油勘探资料表明该断裂整体倾向北，倾角较陡，在东段显示出正断特征，中段和西段表现为逆断层。新郑-太康断裂在浅部向上分叉，与北部次级断裂组合为负花状构造，具有明显的离散走滑特征，且新近纪以来活动明显，新近系底界断距可达 150m（图 2，据河南油田勘探开发研究院内部资料）。

此外，周口拗陷内发生过多次 5.0—6.0 级地震，地震活动水平略高于太康隆起，区内最新的地震为 2010 年太康 4.7 级地震，震中位置见图 1（a），发震构造为新郑-太康断裂（孙杰等，2014）。

2 探测实施与结果

2.1 探测仪器及测试方法

本次 H_2 测试采用的仪器为德国德尔格公司生产的 X-am 7000 型多气体检测仪，传感器为电化学传感器，当气体扩散进入传感器后，在反应电极表面经过氧化或还原反应产生电流，并通过外电路流经 2 个电极，可通过外电路的负荷电阻测量气体浓度。该传感器可检测 H_2 浓度上限为 2000ppm，灵敏度为 5ppm，测量误差 $\pm 5\%$ 。该仪器稳定性和抗干扰能力均较强。

测线位置选择在新郑市解放路路侧和马庄村-前宫村的村间道路旁，测线位置见图 1（b），附近无污染源，地下水位稳定，埋深约 10—15m。测量前，先对仪器进行校正，稳定后开始测量。测量时，先用锤将 1.2m 的钢钎打入土中成孔，拔出后立即将锥形麻花钻收集管拧入土中封孔，土壤气体通过锥形麻花钻收集管、胶皮管后进入测试仪器，由于 H_2 比重小，逸出迅速。测量多次取峰值作为最终结果。

2.2 数据处理及断裂浅部定位

异常值的判定采用数值分析法，考虑到：①测试区附近无污染源，空气中 H_2 浓度背景值较低（2.113—5.998ppm）；②松散的第四系覆盖较厚， H_2 逸出条件复杂多变；③该断裂东段

(太康段) 向上延伸并分叉形成花状构造, 分支断裂数目多且规模不等(中国地震局地球物理勘探中心, 2015), 同时断裂两侧裂隙发育, 气体的逸出通道彼此相连或将导致产生于次级断裂深部的 H_2 沿逸出条件更好的主断裂逸出, 即气体发生偏移, 我们认为异常值下限定得过高会导致部分次级断裂信息的丢失, 因此将平均值与 1 倍标准差之和、平均值与 2 倍标准差之和综合考虑来划分异常。

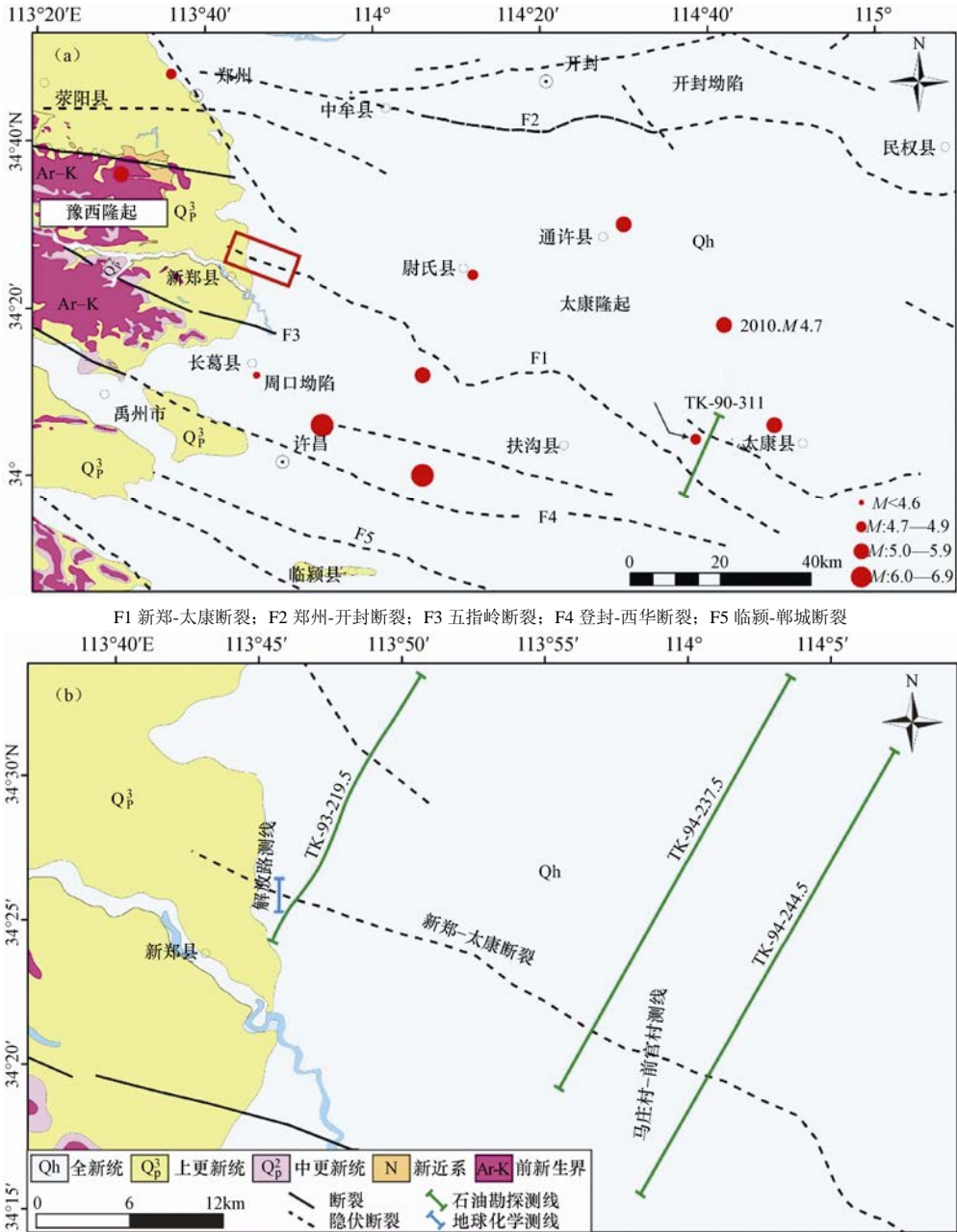


图 1 区域地震、地震构造与测线分布图 (图 (b) 为图 (a) 红框区的放大图)

Fig. 1 Regional seismic-tectonic map and location of survey lines

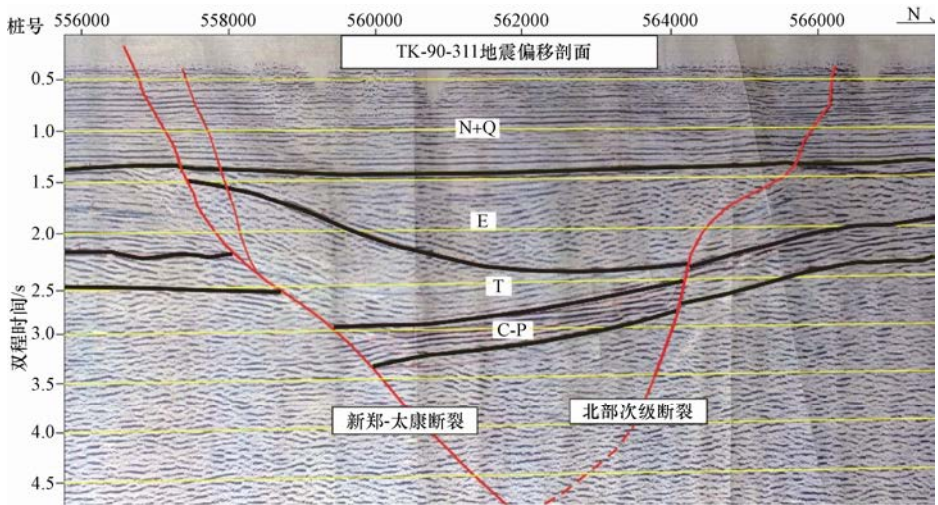


图2 新郑-太康断裂东段 TK-90-311 地震偏移剖面 (剖面位置见图 1 (a))

Fig. 2 Seismic profile No.TK-90-311 across the eastern segment of Xinzheng-Taikang fault

断层的活动性质、几何特征 (Ciotoli 等, 2007) 以及破碎带和断层的发育程度 (King 等, 1996; Annunziatellis 等, 2008) 在一定程度上决定了地下裂隙的产生、分布及闭合, 进而通过改变地下通道的连通状况来影响气体由深至浅的迁移过程。断层气浓度曲线蕴含丰富的地质信息, 以下将对 2 条测线分别进行讨论:

(1) 解放路测线

该测线位于新郑市西北解放路路侧 (图 1 (b)), 共 39 个测点, 长 2035m, 平均测点间距 50m, 当 H_2 浓度明显高时, 加密到每 25m 一个测点。至测线两端, 测点间距扩大至 100m。

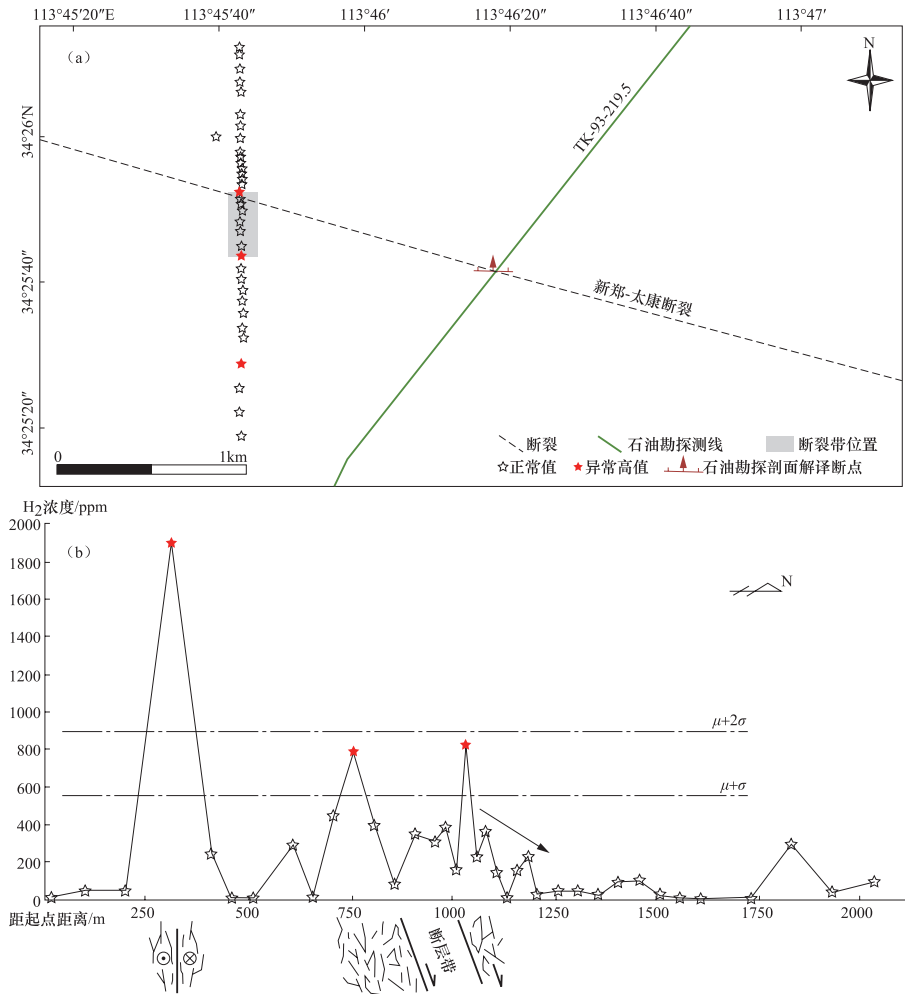
表 1 解放路测线异常点位及类型

Table 1 Location and type of anomalies from the Jiefang road survey line

距测线起始点位置/m	H_2 浓度/ppm	异常类型	断层倾向
310	1901	A	近直立
760	789	B	N
1035	814.1	B	N

各测点 H_2 浓度的平均值 $\mu=214.6\text{ppm}$, 标准差 $\sigma=341.4\text{ppm}$, 我们将浓度高于 $\mu+2\sigma$ 的异常点定为 A 类异常, 表示异常幅度大, 异常形态明显, 对应规模较大的断裂; 将高于 $\mu+\sigma$ 的异常点定为 B 类异常, 该类异常幅度稍小, 对应规模稍小的次级断裂。该测线异常点位置及类型见表 1, 解释后的断裂见图 3。 H_2 浓度在 310m 处异常高 (1901ppm), 为 A 类异常, 且明显高于两侧, 反映气体的逸出条件向两侧逐渐变差, 破碎带集中在一个较窄的范围, 故判断该处发育近直立的走滑断裂 (Ciotoli 等, 2007); 在 760m 与 1035m 处 H_2 浓度接近 (分别为 789ppm 和 814.1ppm), 为 B 类异常, 在气体浓度曲线上表现出“双峰”态。由于新郑-太康断裂长期活动, 带内充分发育断层泥等细粒物质导致断裂带渗透性降低, 气体绕过渗透性低的断层带而从其两侧逸出, 造成 860—1010m 间 H_2 浓度低

(340—360ppm) 的现象, 该处对应断裂带 (King 等, 1996; Annunziatellis 等, 2008), 其宽约 150m。H₂ 浓度在 1035m 处向北迅速下降, 判断该断裂带倾向北。根据异常类型判断, 该断裂带的规模、活动性不及南部的走滑断裂 (张大其, 1991; 孟广魁等, 1997; 焦德成等, 2012)。



(a) 测线异常点位与石油勘探资料解释的深部断点位置对比结果; (b) 测线 H₂ 浓度曲线及解释

图 3 解放路测线 H₂ 测量结果与异常分析

Fig. 3 The H₂ concentration curve of the Jiefang road survey line

平面上, 将各异常点位置与断裂深部资料相比对可以发现, 北部断裂带位置与断裂深部位置吻合较好。该测线 H₂ 浓度的高异常准确地反映了断裂的浅层位置 (图 3)。

(2) 马庄村-前宫村测线

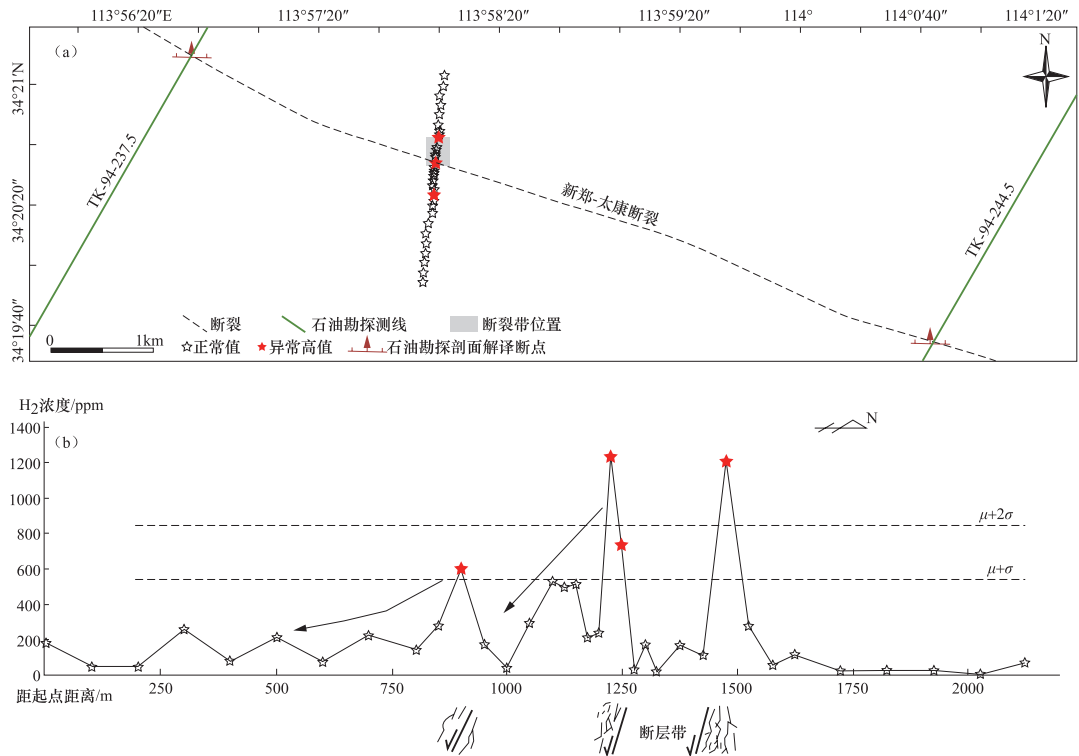
该测线位于解放路测线的东南 (图 1 (b)), 测线长 2125m, 共 35 个测点, 点间距在测线两端为 100m, 高值附近加密到每 25m 一个点。各测点间 H₂ 浓度平均值 μ 为 256.8ppm, 标准差 σ 为 302.7ppm。测线异常点位及类型见表 2, 解释后的断裂见图 4。

表 2 马庄村-前宫村测线异常点位及类型

Table 2 Location and types of anomalies from the Mazhuang-qiangong survey line

距测线起始点距离/m	H ₂ 浓度/ppm	异常类型	断层倾向
900	600	B	S
1225	1250	A	S
1475	1210	A	S

根据表 2, 该测线共有 2 处 A 类异常: H₂ 浓度在测线 1225m 和 1475m 处分别为 1250ppm 和 1210ppm, 在浓度曲线上表现出与解放路类似的“双峰”形态, 1275—1425m 之间 H₂ 浓度低 (25—175ppm), 对应断裂带宽约 150m。自 1175m 处向南 H₂ 浓度逐渐下降, 故判断该断裂带倾向南。900m 附近存在一处 B 类异常, H₂ 浓度为 600ppm, 对应活动性稍弱的次级断裂 (图 4)。

(a) 测线异常点位与深部石油勘探资料解释的断点位置对比结果; (b) 测线 H₂ 浓度曲线及解释图 4 马庄村-前宫村测线 H₂ 测量结果与异常分析Fig. 4 The H₂ concentration curve of the Mazhuang-qiangong survey line

断裂在该段的深部位置由 TK-94-237.5 测线和 TK-94-244.5 测线控制, 可以看到 H₂ 浓度异常点位置与石油勘探资料确定的断裂深部位置吻合较好, 前者较准确地反映了断裂的浅层位置。

对比解放路和马庄村-前宫村 H₂ 浓度曲线可知, 2 条 H₂ 浓度曲线解释出了相近的断裂组合, 即北部存在宽约 150m 的断裂带, 以及向南约 325—450m 处发育的单支断裂。不同之处在于断裂

带的倾向：解放路 H_2 浓度曲线显示断裂带北倾，而马庄村-前宫村 H_2 浓度曲线显示断裂带倾向南，倾向的变化表明新郑-太康断裂具有明显的走滑特征（漆家福等，2003；宋明春等，2015）。

不仅如此，我们还发现如下现象：

就单一测线而言，解放路 H_2 浓度曲线表明该处南部的断裂规模更大、活动性更强，而马庄村-前宫村 H_2 浓度曲线则表明该处北部断裂带的规模更大、活动性更强；就 H_2 浓度沿断裂走向的变化规律而言，由北西向南东，北部断裂带的 H_2 浓度升高，而南部断裂的 H_2 浓度降低。

3 结论与讨论

通过圈定和分析解放路与马庄村-前宫村测线上 H_2 浓度的异常点，与深部石油勘探资料相对比，获得的主要结论如下：

(1) 2 条测线出现的高水平 H_2 点位与石油勘探资料确定的断裂深部位置吻合度较高，准确地反映了断裂的浅层位置。

(2) 2 条测线同步解释出一条走滑断裂，以及其北部发育的一条宽约 150m、产状变化的断裂带，产状变化与其走滑性质有关。

值得注意的是，就气体浓度沿断裂走向的变化规律而言，由北西向南东，北部断裂带 H_2 浓度升高，而南部断裂的 H_2 浓度降低。在气体逸出条件相近的前提下，南、北 2 条断裂的活动性呈“此消彼长”的关系。考虑到 2 条测线相距约 20km，我们认为这 2 条测线可能位于一组左旋左阶断裂的阶区部位。但由于受到测线密度的限制，该结论有待进一步证实。

此外，关于该区氢气来源的问题亦值得讨论。华北地台具有由结晶基底和沉积盖层组成的“双重结构”（翟明国，2011；朱日祥等，2012；滕吉文等，2014）：中条运动形成的结晶基底及上覆未经变质的中元古代以来的沉积盖层，盖层以碳酸盐岩和碎屑岩为主，而这些岩层中产生的 H_2 微不足道（Ware 等，1984）。目前已有大量实验表明， H_2 与 CO_2 和 CH_4 不同，其主要为无机过程的产物（Giardini 等，1976；Ruff 等，1980；Sugisaki 等，1983）。构造应力作用下，破碎的矿物如石英（Hughes-Schrader 等，1961；Wakita 等，1980）、长石及硅酸盐矿物（Sugisaki，1980）表面的原子团与渗入裂隙中的水反应可以生成 H_2 （Schardner 机制，即 $Si+H_2O \rightarrow Si-OH+H_2$ ），含有黑云母的花岗岩可释放更多的 H_2 （Sugisaki 等，1983）。前已提及，太康隆起的沉积盖层下为震旦系火成岩、以花岗片麻岩及黑云母片麻岩为主的结晶基底，富含石英、黑云母等矿物，在动力破碎后通过反应释放出大量 H_2 ，可能是本区土壤氢气的主要来源，由此可初步判断新郑-太康断裂至少为发育于上地壳的断裂，但由于缺乏更广泛、更精确的断层气及钻孔资料，该结论有待进一步研究和证实。

参考文献

- 陈刚，严欣圭，1995. 断层土壤氢气的特征. 西北地质，16（3）：22—28.
- 冯军，李红光，吴涛等，2011. 邢台地区隐伏断裂地球化学探测. 震灾防御技术，6（1）：26—35.
- 冯希杰，1988. 中国大陆北西—北北西向断裂系统与强震. 西安地质学院学报，10（3）：47—55.
- 河南省地质矿产局，1989. 河南省区域地质志. 北京：地质出版社.
- 河南石油勘探指挥部地质大队，1976. 太康隆起及其周缘古生代地层层序与生储盖组合特征报告.
- 焦德成，潘祖寿，王增光等，2012. 断层气测量用于银川地堑隐伏断裂活动性的研究. 防震减灾学报，28（3）：41—47.

- 李祖武, 1983. 中国东部北北西——北西向构造系的基本特征. 地震研究, **6** (3): 339—348.
- 刘菁华, 王祝文, 刘树田等, 2006. 城市活动断裂带的土壤氦、汞气评价方法. 吉林大学学报(地球科学版), **36** (2): 295—297, 304.
- 刘学领, 马建英, 杨绪连等, 2011. 断层气探测方法在深隐伏活断层探测中的有效性研究. 地震, **31** (1): 67—74.
- 孟广魁, 何开明, 班铁等, 1997. 氦、汞测量用于断裂活动性和分段的研究. 中国地震, **13** (1): 43—51.
- 漆家福, 肖焕钦, 张卫刚, 2003. 东营凹陷主干边界断层(带)构造几何学、运动学特征及成因解释. 石油勘探与开发, **30** (3): 8—12.
- 炼化部六四六厂研究所, 1972. 周口坳陷研究工作小结.
- 邵云惠, 1980. 试论我国东部的北西向构造及其理论意义. 中国地质科学院院报 562 综合大队分刊, **1** (1): 19—27.
- 邵永新, 杨绪连, 李一兵, 2007. 海河隐伏活断层探测中土壤气氦和气汞测量及其结果. 地震地质, **29** (3): 627—636.
- 石油化工部物探局, 1975. 太康地区及周口地区南部地震勘探成果报告.
- 宋明春, 张军进, 张丕建等, 2015. 胶东三山岛北部海域超大型金矿床的发现及其构造-岩浆背景. 地质学报, **89** (2): 365—383.
- 苏鹤军, 张慧, 刘旭宙, 2005. 兰州市刘家堡隐伏断层的地球化学探测方法试验. 高原地震, **17** (1): 9—16.
- 孙杰, 胡凤英, 杨龙翔等, 2014. 2010 年 10 月 24 日周口太康 M_S 4.6 地震的震源机制解. 地震地磁观测与研究, **35** (3—4): 8—14.
- 滕吉文, 李松岭, 张永谦等, 2014. 秦岭造山带与沉积盆地和结晶基底地震波场及动力学响应. 地球物理学报, **57** (3): 770—788.
- 汪成民, 李宣瑚, 1991. 我国断层气测量在地震科学研究中的应用现状. 中国地震, **7** (2): 19—30.
- 王志铄, 王明亮, 赵显刚等, 2017. 太原隆起南缘新郑-太原断裂的新生代活动形迹与地震活动. 地震地质, **39** (1): 117—129.
- 徐杰, 马宗晋, 陈国光等, 2003. 中国大陆东部新构造期北西向断裂带的初步探讨. 地学前缘, **10** (S): 193—198.
- 姚道平, 卓群, 张艺峰等, 2008. 厦门城市隐伏断层控制性地球化学探测. 震灾防御技术, **3** (4): 451—458.
- 翟明国, 2011. 克拉通化与华北陆块的形成. 中国科学: 地球科学, **41** (8): 1037—1046.
- 张大其, 1991. 利用测汞技术研究隐伏断裂及其活动性. 地震学刊, (1): 97—100.
- 张慧, 苏鹤军, 李晨桦, 2013. 合作市隐伏断层控制性地球化学探测场地试验. 地震工程学报, **35** (3): 618—624.
- 中国地震局地球物理勘探中心, 2015. 太康县浅层地震勘探报告.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光等, 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, **42** (8): 1135—1159.
- Annunziatellis A., Beaubien S.E., Bigi S., et al., 2008. Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Latera caldera(central Italy): implications for CO₂ geological storage. International Journal of Greenhouse Gas Control, **2**(3): 353—372.
- Ciotoli G., Lombardi S., Annunziatellis A., et al., 2007. Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino Plain, Central Italy. Journal of Geophysical Research, **112**(B5): B05407.

- Giardini A. A., Subbarayudu G. V., Melton C. E., 1976. The emission of occluded gas from rocks as a function of stress: its possible use as a tool for predicting earthquakes. *Geophysical Research Letters*, **3**(6):355—358.
- Hughes-Schrader S., Schrader F., 1961. The kinetochore of the Hemiptera. *Chromosoma*, **12**(1):327—350.
- King C.Y., King B.S., Evans W. C., et al., 1996. Spatial radon anomalies on active faults in California. *Applied Geochemistry*, **11**(4): 497—510.
- Ruff L., Kanamori H., 1980. Seismicity and the subduction process. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **23**(3):240—252.
- Sugisaki R., 1980. Major-element chemistry of argillaceous sediments at Deep Sea Drilling Project Sites 442, 443, and 444, Shikoku Basin. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, **58**:719—735.
- Sugisaki R., Ido M., Takeda H., et al., 1983. Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity. *The Journal of Geology*, **91**(3):239—258.
- Wakita H., Nakamura Y., Kita I., et al., 1980. Hydrogen release: new indicator of fault activity. *Science*, **210**(4466):188—190.
- Ware R. H., Roecken C., Wyss M., 1984. The detection and interpretation of hydrogen in fault gases. *Pure and Applied Geophysics*, **122**(2—4):392—402.

Exploration for the Shallow Location of Xinzheng-Taikang Fault via Fault Gas H₂

Ma Xingquan, Wang Zhishuo, Sun Jie, Li Tao, Li Yuan, Cai Yingzhe,
Xia Xiujun and Zhao Xian'gang

(Earthquake Administration of Henan Province, Zhengzhou 450016, China)

Abstract The Xinzheng-Taikang Fault, striking NW, as a buried fault beneath the eastern plain, is a large-scale fault which induced the earthquake, M_L 4.7 in 2010, Taikang county, causing 12 wounded. Confirming the shallow location of the fault is of great significance to seismic hazards defensing. We launched 2 geochemical survey lines across the fault in the Xinzheng area based on the knowledges from Petroleum exploration data, and the outcomes indicated the concentration of H₂ at abnormal points in the Jiefang Road survey line is 16—33 times over the background level, while the times of the Mazhuang-Qiangong survey line is 40—50. The two survey lines indicate similar structures of the fault belt, spanning about 150m, and varied inclination and might be filled with fault-clay so as to influence the migration of the gas. More important, the shallow location of the fault from concentration curve of H₂ interpretation fits well with that on deep seismic profiles. The research comes out the conclusion that the distribution of the fault gas, H₂ is an efficient indicator of the location of buried faults in similar area.

Key words: Xinzheng-Taikang fault; Geochemical exploration; Hydrogen; Buried fault; Petroleum exploration data