

城市活动断裂探测的方法和技术

邓起东¹, 徐锡伟¹, 张先康², 王广才¹

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

摘要:发生在城市范围内的直下型大地震可能产生巨大的灾害,包括高的振动破坏和强的断裂地表错动。因此,城市范围内的直下型活动断裂和隐伏活动断裂探测及地震危险性和危害性评价是十分重要的。立足于城市环境复杂、污染重、干扰强的特点,文中介绍了城市活动断裂探测的主要方法,包括地质地貌、地球化学和地球物理方面的多种探测方法。在地质地貌方法中,最新断裂活动面的断错地质地貌制图及针对断裂新活动和古地震研究的钻探和槽探具有特别重要的意义,年轻地质体和地貌面年龄测定是一项关键技术;地球化学探查,尤其是多种气体测项在隐伏断裂初步定位中起到先锋作用;在各种地球物理探测中,浅层地震勘探起着关键作用,而在探查活动断裂深部背景和孕震可能性时,各种深地震探测方法是十分重要的。在城市活动断裂探测这一新的工作中,必须更多地强调和更好地做到地质地貌、地球化学和地球物理探测的结合,做到多种探测手段和勘探方法的综合运用,这样才能做好断裂定位、断裂活动性判定及分析断裂孕震条件工作。

关键词:城市;活动断裂探测;方法和技术

中图分类号: P315.61; P631; P632 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2321(2003)01-0093-12

0 前言

由于活动断裂是一种现代正在活动的构造,它与地震和地质灾害紧密相关,从而对城市和工程安全直接造成威胁。城市范围内发育的活动断裂,包括隐伏活动断裂被称为直下型断裂,它所控制的直下型大地震会使一个城市发生毁灭性破坏,造成大量人员的伤亡,沿发震断裂产生地表错动更是最严重的位移带和破坏带,现代工程技术尚无法抗拒。由于现代社会城市人口和财富高度集中,其破坏性和危害性更大。早在 20 世纪初,1906 年美国旧金山 7.9 级地震和 1923 年日本东京 8.2 级地震就使这两个大城市遭到毁灭,其中的旧金山地震沿 San Andreas 断裂发生,右旋水平位移达 6.1 m^[1]。1976 年我国唐山 7.8 级地震使这一百万人口的重要工业城市毁于一旦,仅死亡人数即达 24 万以上,经济损

失达数百亿人民币,沿通过市区的发震活动断裂——唐山断裂发生了长约 10 km 的地表断层,右旋水平位移达 2~3 m,垂直位移 0.7~1 m^[2]。1995 年日本沿大阪—神户地区野岛—会下山—西宫断裂发生的阪神 7.2 级地震使神户市和大阪市遭到严重破坏,经济损失高达 1 000 亿美元,死亡人数达 6 400 余人,沿断裂产生的地表位移大于 1 m^[3]。近年来相继发生的 1999 年土耳其伊兹米特 7.4 级和我国台湾集集 7.6 级地震再次证明了这一点,它们不仅造成了数以万计的人员损失和几十亿乃至 100 亿美元以上的经济损失,而且沿发震活动断裂产生的位移势不可挡,造成无法抗拒的地面错动带,沿带地面峰值加速度亦远远高于周围地区,从而大大加重了地面建筑物的破坏。

由于大城市遭受直下型地震的打击,一些国家和地区政府开始注意城市活动断裂探测工作。20 世纪 90 年代,由于洛杉矶地区先后遭到 1994 年北岑地震和 1999 年赫克托迈地震的袭击,美国政府在震后组织开展了大规模活动断裂探测工作,并实施了 LARSE(Los Angeles Region Seismic Experiment)计划,希望通过人工地震探测查清洛杉矶盆地地下可能发生大地震的隐伏活动断裂,查明未来可能发生

收稿日期:2002-11-25

基金项目:国家发展计划委员会高新技术项目(2001977)

作者简介:邓起东(1938—),男,研究员,博士生导师,构造地质学专业,主要从事活动构造、工程地震和地球动力学研究工作。E-mail: qddeng@yahoo.com.cn

直下型地震的震源构造^[4,5]。1995年日本阪神地震后,日本政府即在原有工作基础上,增加投资,对8个地区的主要活动断裂进行紧急调查,并首先在东京、京都和大阪等城市密集区的关东平原、浓尾平原和京都盆地开始实施综合地球物理探测计划,准备在取得经验后,向其他大城市地区逐步推广,以探测平原区下的活动断裂。为了了解首都圈活动构造的现代运动,还在首都圈开展“首都圈广域地形变观测计划”,主要利用VLBI(Very Long Baseline Interferometer,超长基线干涉计)和SLR(Satellite Laser Ranging,卫星激光测距)进行连续观测。

吸取了唐山地震和国内外其他一些地震的教训,我国政府对以活动断裂为代表的活动构造及其地震危险性问题一直给予了极大的重视,20世纪80—90年代,国家地震局就通过“七五”、“八五”和“九五”重点研究计划对中国活动断裂进行了逐步深入的定量研究工作,20世纪90年代,一些城市开始对通过城市的活动断裂或隐伏断裂进行探测和研究工作,并取得了很好的探测结果。90年代末,我国开始全面制订大城市活动断裂探测和地震危险性评价计划,近年已在福州等城市进行试验性工作,取得了初步的结果,为全面开展这一工作打下了良好的基础,从而将为我国经济和社会的可持续发展作出贡献^[6]。

1 城市活动断裂探测的特殊性和需要解决的关键问题

1.1 城市活动断裂探测的特殊性

由于城市自然条件特殊,人类活动改造强烈,存在各种强干扰背景,环境污染问题突出,社会活动复杂,在城市地区进行活动断裂探测是一件工作难度大,对仪器设备要求高,活动组织更加复杂的工作。

城市一般位于盆地或平原区,被不同厚度的第四纪松散沉积物覆盖,断裂或者全部成为隐伏断裂,或者断裂带中的最新活动面因断裂活动从山区向盆地迁移而埋藏于地下,即使断裂的最新活动遗迹,如断层崖等出露地表,也会因人类活动而被改造或被破坏,这都增加了地表地质地貌研究的难度;另一方面,第四纪松散沉积物对有效信号强烈吸收,断裂两侧松散沉积介质物性差异又较小,这又使通过地球物理探测隐伏断裂的难度加大。

现代城市地面地下都有大量建筑物和构筑物,

街道纵横交错,地下地上管道、电缆和各种生命线工程密布,存在各种高频振动和强干扰噪音,这就要求探测设备必须具有高信噪比、宽频带,主频高,而且要有与之相适应的软件系统。城市中环境污染问题突出,工业和生活垃圾及废弃物埋藏点多,地面和地下水污染程度高,这也给地球化学和地球物理探测带来各种干扰,增加了探测工作的困难。城市人口集中,各行各业关系复杂,探测工作会涉及或影响到社会的各个方面,探测施工时协调工作比较复杂。

1.2 城市活动断裂探测需要解决的关键问题

开展城市活动断裂探测,评价其地震危险性和危害性,提出减灾对策是一项复杂的系统工程,必须要解决一系列科学问题。我们曾用6句话对这些问题加以概括,这6句话是“有没有,活不活,深不深,震不震,错不错,好对策”^[6]。以下我们对这几个问题作一简单的解释。

“有没有”是首先要解决城市范围内有无直下型断裂及其定位问题。我们可以根据不同情况通过三种方式加以解决:汇总已有的资料,实测控制性剖面,或开展网格状剖面探测,以确保不漏掉规模较大的断裂,并对断裂进行初步定位。然后在详细勘查中加大探测工作量和精度,逐步做到精确定位。“活不活”是指断裂的活动性研究,只有晚更新世距今10~12万年以来仍然活动的断裂才有可能被考虑具有发生中强地震的危险性,所以,断裂切割的最新地层和地貌面及其年龄是一个要解决的关键问题。“深不深”是要解决断裂的切割深度和震源构造问题,地壳浅表的断裂不可能发生大的破坏性地震,板内地震一般震源深度可达10 km以上或接近10 km,所以,要查明地壳上部断裂的深部特征和发震构造模型。如果通过以上工作在城市内发现了具有一定规模,具有最新活动,且具有深部活动背景的活动断裂,则需要进一步查明其发生突发错动,即发生大地震的可能性及其最大震级,也要研究这种直下型地震一旦发生,有无可能发生地表错动及其危险程度,这就是“震不震”和“错不错”问题。最后,应该在此基础上提出避让方案和防灾措施,应该建立数据库,在计算机平台上反映出图形化和可视化的成果,供政府和有关部门方便应用。

本文只涉及到前述6句话中的前3句话,即“有

Kinugasa Y, Irikura K, Kikuta H. Comprehense geophysical survey for large urban areas in Japan. 2000.

没有”、“活不活”和“深不深”问题,也就是活动断裂探测的方法和技术问题。有关活动断裂的地震危险性和危害性评价及防震减灾措施,即“震不震”、“错不错”和“好对策”问题,我们已在另文中讨论到^[6],本文不再赘述。

2 城市活动断裂探测的主要方法

由于城市活动断裂探测的特殊性,我们必须综合应用地质地貌、地球化学和地球物理的各种探测方法,而且需要适应城市特有的环境和条件,采取不同的技术和设备,以下对主要探测方法及有关问题作一简要的叙述。

2.1 城市活动断裂探测的地质地貌调查

地质地貌调查的基本目的是通过遥感资料分析和地面实测工作进行地表断裂定位及最新活动面的确定。

(1) 遥感图像处理和分析:各种卫星影像,包括数字卫星影像、雷达卫星影像的图像处理和解释;不同时期、不同比例尺航空照片的判读,尤其是早期较大比例尺航空照片的收集和判读是十分重要的。我们可以通过图像变化反映出的断错地质地貌,区域地形地貌变化,地下水分布变化等来发现断裂及其最新活动面。

(2) 断错地质地貌制图:对各种地质地貌,尤其是断错地质地貌特征进行实地调查,对断裂几何学和运动学参数,最新断裂错动面和断错地貌,地震地表破裂带,地裂缝带等进行实地详细调查,重点地段沿断裂最新活动带进行条带状 1:1 万比例尺活动断裂填图或制图。要特别注意以下问题:断裂和最新错动面的定位,断裂运动性质及运动量,水系特征和水系变迁,水系变位和变异点的分布特征,阶地和冲洪积扇的变位及变异点的分布特征,地貌面和年龄确定,断层崖及其活动历史和年龄,断裂位移年龄和位移速率及其变化。值得指出的是,要特别注意收集早期地形测量资料或地形图,它常常可以反映城市人类活动改造前的原始地貌形态,从而提供有价值的资料。图 1 是玛纳斯活动断裂和 1906 年玛纳斯地震地表破裂带穿过河流、一级全新世阶地形成的断层崖^[7]。

(3) 钻探:钻探工作在活动断裂探测和地震危险性评价中有着特殊的用途和作用,主要解决以下问题:第四纪地质演化和环境变迁,断裂的进一步定

位,地球物理探测界面的地质含义及其年龄确定,断裂最新位错历史,包括晚第四纪以来的断裂错动次数、位错量、年龄及错动序列的变化等。第一方面工作是一般性常规工作,可提供城市在最新地质时期背景性环境活动状况;第二方面是在地球物理探测的基础上,通过断裂两侧的钻探工作使断裂达到更精确定位;第三方面,钻探将有助于取得地球物理探

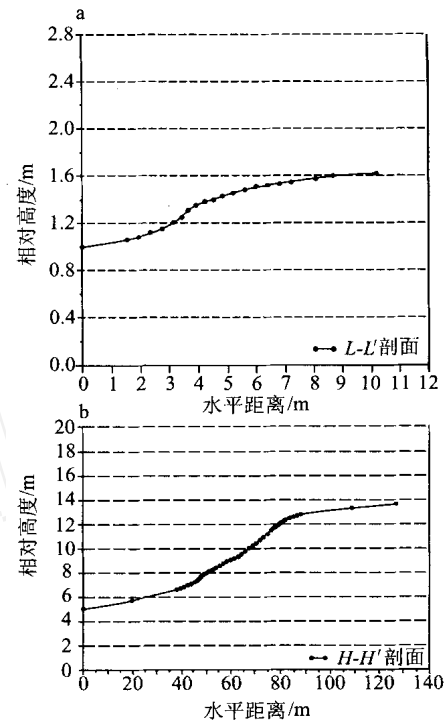


图 1 断层崖地形剖面^[7]

Fig. 1 Topographic profiles of a fault scarp

a—1906 年玛纳斯地震地表破裂带切割阶地形成的断层崖;
b—活动断裂切割全新世一级阶地形成的断层崖,断层崖下部最新自由面为地震地表破裂带通过处

测资料解释所需要的物性参数,分层界面的物质成分及地质年代和年龄;第四方面,断裂两侧的钻探将按高密度和高精度要求进行,保证钻孔穿透地球物理探测中发现的已断界面和未断界面乃至整个第四系,对晚第四纪地层分层及年龄进行特殊详细的划分和取样。这样,我们就可以在地球物理探测基础上对断裂准确进行定位,并确定断裂最后一次活动年龄和位移参数,断裂多次错动在地层、沉积相和沉积厚度等方面的证据,古地震错动序列及其重复间隔等^[8,9]。

(4) 槽探:槽探用于活动断裂和古地震研究始于 20 世纪 70 年代^[10]。目前主要用于活动断裂定位,确定断裂最新活动带的宽度,查明古地震事件及古

地震活动历史。由于后一目的的特殊要求,对槽探的布署、定位、编录等均有特殊的要求,包括对走滑型和倾滑型活动断裂探槽的布署有不同的要求,编录坐标网的高要求和编录的精细化等。在编录过程中对古地震事件及其在古地貌、古构造、古沉积物、古地面和古土壤等方面的遗迹及其相互关系要特别加以识辩和记录,藉以分析距今 2~3 万 a 以来的断裂突发错动历史、年龄及重复间隔。探槽中断裂多次错动和被覆盖、上下断距的倍数增减关系、古构造楔、古崩积楔、古充填楔和古断塞坝堆积楔的存在,古液化、古地裂缝等的发育均是确定古地震事件的依据(图 2) [10~13]。

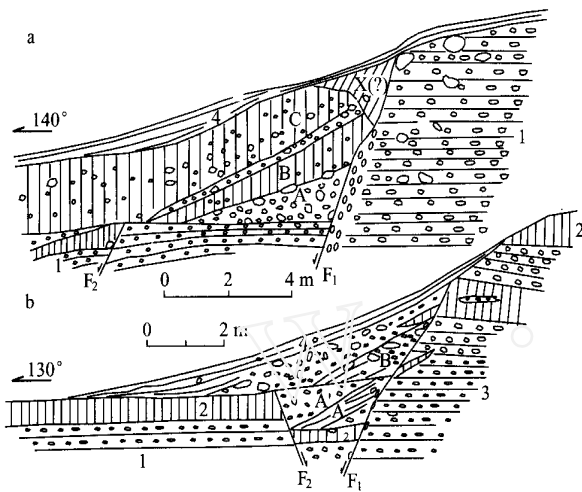


图 2 槽探实例——贺兰山山前断裂 Tc-3(a)和 Tc-4(b)探槽剖面 [11]

Fig. 2 An example of trench - trench logs for Tc-3(a)

and Tc-4(b) along Helanshan piedmont fault

1—砾石层;2—黄土状土夹砾石;

3—砾石夹黄土状土透镜体;4—近代堆积,黄土状土夹砾石;

A, B, C—崩积楔堆积;X, A'—充填楔堆积

(5)大地切片探测:这是在对活动断裂和古地震进行槽探的基础上,由于槽探工作在选址或深度上遇到困难的情况下,日本中田高和岛崎邦彦于 1997 年提出直接从地下提取地层切片,以观测断裂活动特性的一种方法,并开发制造出了大地切片装置 (geoslicer) [14,15]。它包括金属制成的“J”字形地层切片采样屉 (sample tray) 和采样屉开放面的金属盖板 (shutter plate)。一般分为两种:长方型切片装置长 4~10 m,宽 30~50 cm,适合于连续观察比较深的堆积和构造;宽幅型切片装置宽 1 m,长 2 m 或宽 1.2~1.5 m,长 4 m,因而可以得到类似探槽壁面的地层和构造剖面。活动断裂探测多用后一种装置。

采用振动锤即可把采样屉和盖板打入地下,用吊车则可把它们从地下拔出(图 3)。用大地切片机既可在面向地面以下切片,以获得地层和构造断面,沿走向重复多次切片,则可获得较长的地层和构造剖面,也可以在探槽内向下切片,以获得比槽探深度更深的地层和构造剖面,从而加强槽探工作。目前,这一方法已在日本、美国和土耳其等国得到应用,不仅被应用于活动断裂的古地震探测,而且在与地震相关的海啸、沙土液化及滑坡和海滨堆积物等的调查中均得到应用 [15]。

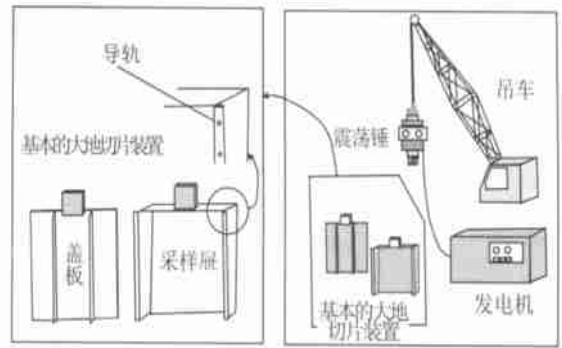


图 3 大地切片装置 [15]

Fig. 3 Sketch map for installation of a geoslicer

(6)年轻地质体系的年龄测定:年龄测定是晚第四纪活动构造定量研究的关键问题之一,它包括对各类年轻地质体或地貌面进行年龄测定。目前已应用的方法有碳十四 (^{14}C 和 AMS^{14}C)、热释光 (TL)、光释光 (OSL)、电子自旋共振 (ESR)、裂变径迹 (FT)、钾-氩 (K-Ar)、铀系 (U 系)、宇宙成因核素等同位素年代学方法,也包括磁性地层学、孢粉分析和岩石漆等方法。主要方法的测年范围见表 1,本文不拟叙述各方法的原理和具体测年技术,读者可以从有关年轻地质体系年代测定文献中找到 [16,17]。值得注意的是各种方法都有其特有的测年对象、样品采集方法和实验条件,必须严格遵守(表 1)。此外,技术发展使测年方法不断发展,并形成新的测年技术。如加速器质谱方法 (AMS) 的应用既提高了 C , Be 和 ^{26}Al 等方法的灵敏度,也使所耗的样品量大大减少,从而提高了测样的效率 [16,17]。

2.2 城市活动断裂探测的地球化学探查

某些高挥发性元素 (气体) 从地球内部持续释放,且沿着渗透性相对较强的断裂带或裂隙带向地表迁移,在地表浅部的相应部位形成这些气体的异常分布晕。地球化学探查的任务就是捕捉、识别和

表 1 主要年轻地质年代学测年方法适用范围简表

Table1 List of applicable range of main dating methods in neo \ | geochronology

测年方法	适用测年范围/a	可测对象	特殊采样要求
¹⁴ C	300 ~ 4 × 10 ⁴	木头、木炭、泥炭、淤泥、古土壤、贝壳、珊瑚、钙质结核、碳酸盐类沉积物、水中碳酸氢根等。	防止现代植物根系、死碳和有机物污染, 样品量 500 g。
OSL 和 TL	10 ² ~ n × 10 ⁵	各种粘土或粉砂级曾被充分曝光的风积物、湖相、河流相、海相、洪积相、冰水相沉积物或曾经历过高温的古陶片、古砖瓦、古窑壁、火山喷发物或烘烤物、断层泥等。	严禁曝光或水分丢失, 样品及周缘 30 cm 范围内岩性均一。应尽量采集块状 (8 cm × 8 cm × 8 cm) 样品, 避光密封包装; 对于松散样品, 可用易拉罐或铁罐避光密封包装。记录样品埋深。
ESR	10 ² ~ 10 ⁸	各种盐类 (碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐等)、断层物质 (断层泥、断层充填物如方解石脉)、火山岩、动物化石 (如牙齿、贝壳等) 和各类沉积物。	断层泥应采集滑动面上的样品; 采样后应避免水分丢失。
FT	10 ⁴ ~ 10 ⁹	磷灰石、锆石、榍石、云母、火山玻璃、玻璃陨石。	所采样品尽量新鲜, 样品量 2 kg 左右, 同时记录所采样品的海拔高度和埋深。岩浆岩类最好选择中、酸性岩, 沉积岩类选择砂岩、细砂岩。
K-Ar 和 Ar-Ar	n × 10 ⁴ ~ n × 10 ⁹	火成岩全岩或角闪石、云母、长石等单矿物以及粘土矿物中的伊利石。	1. 尽量在新开挖的剖面采样, 样品要新鲜无蚀变。采集的样品要进行薄片鉴定。尽量选取单矿物, 不能选矿的样品 (如玄武岩) 要去掉其中的包体和橄榄石、辉石、斜长石等斑晶。2. 粘土矿物要选取其中 < 1 μm 的部分, 并利用 X 光衍射和电镜确定其中主要成分类是自生的伊利石。
U 系	n × 10 ⁴ ~ 4 × 10 ⁵	断层中各种充填物如石英脉、方解石脉、石膏脉及其他次生盐类、各种地貌面上的次生盐类如钙质结核、泉华、硅华等、地下含水层中发育的碳酸盐 (如钙板)、盆地中发育的石膏层、石盐、年轻火山岩以及地层中生物壳类和动物骨骼如牙齿等。	10 ~ 50 g。
宇宙成因核素 (¹⁰ Be/ ²⁶ Al)	10 ² ~ 10 ⁶	石英或伟晶岩等含石英的全岩。	裸露地表的基岩或石英质砾石, 一般采集大砾石。

确定这些异常点、晕或异常带的空间位置和随时间的变化特征, 以探查隐伏活动断裂的存在, 为进一步开展地球物理勘探提供依据。地球化学探查的主要测项包括气体和超细固体颗粒 (金属和放射性核素组分), 后者主要用于隐伏盲矿床的探查。气体测项在赋存形态上可分为土壤气 (土壤自由气体和吸附气体)、地下水溶解气和逸出气等。其中, 在活动断裂探测中主要应用土壤气, 测定的组分一般为 Rn, Hg, He, CO₂, SO₂, O₂, CH₄ 及其他碳氢化合物, 以及一些气体的同位素 (¹³C, ³He/⁴He 等)。这些气体的成因是多种多样的, 既有地球深部放气作用来源的, 也有浅部化学、生物、放射成因的。它们通过断裂带运移到地表, 从而成为人们进行地球化学探查的对象。所以, 从某种意义上说, 这种探查的核心是对气体物质运移通道 (断裂或裂隙带) 的探查。

自从 20 世纪 60 年代测汞技术被成功应用于美国内华达州铜矿和金矿的探查以来, 地球化学探查即以其方便、快捷、高效和低成本等特点而在世界范

围内得到迅速发展。在野外进行的气体 (He 和 CO₂) 注入试验表明, 气体能够在与已知断裂相联系的具有较强渗透性的狭窄通道内通过含水层迅速向上运移^[18], 多孔介质中“微气泡”运移的实验室实验也表明, 在相同注入压力的作用下, “微气泡”的运移速度较之干燥条件下单相流的速度要快 10 多倍, 它与压力的关系可用斯托克斯方程来描述^[19]。这些工作进一步从理论和实践上加深了对活动断裂地球化学探查的认识。

活动断裂地球化学探查的野外现场采样主要是通过深 1 m 左右的浅孔进行的, 通常使用空心的钻进工具, 并将 Teflon 类毛细管与钻具的空心管相连接, 应用大气采样器定流量、定时间抽气采样, 样品测试分析既可在现场就地地进行, 也可将样品送回实验室进行室内检测。测试仪器有红外气体分析仪 (RED, ACD-GB)、质谱仪 (ALCA TEL, 100HDSF), 等离子体质谱计 (ICP-MS) 和近年来开发的便携式气相色谱仪 (GC-200) 等。发现异常应立即加密进

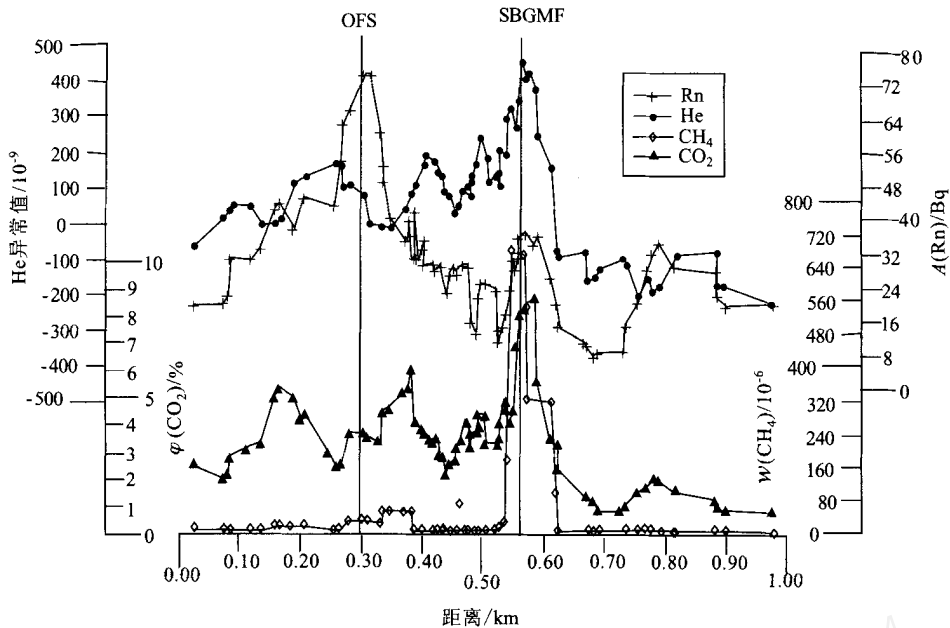


图4 意大利 Fucino 盆地地球化学探测结果^[21]

Fig. 4 Geochemical prospecting result in the Fucino basin, Italy

行取样分析。

提高测试分析技术的灵敏度和分辨率,开发快捷、便携式仪器是地球化学探查的关键技术环节,近年来兴起的地球化学遥感技术,如用于环境变化监测的地球化学卫星遥感技术也将可能被应用于活动断裂地球化学探查之中。

城市中存在的地面地下建筑物、道路、桥梁、回填土、垃圾(场)、废物、废水排放等不仅给地球化学探查工作的实施造成困难,而且它们也是重要的干扰因素。在探查中应特别注意避开具有干扰的污染地和污染源。在分析中孤立的异常应注意进行综合对比研究。

目前美国、日本、意大利、俄罗斯和我国均已在活动断裂地球化学探查中取得成功的实例^[20~24]。图4是其中的一个实例^[21]。图中表示的是 Ciotoli 等 1998 年在意大利中部 Fucino 盆地测线 3 的探查结果,1915 年在该盆地区曾发生一次 7 级地震,产生地表断错,在这条测线上,He、CH₄ 和 CO₂ 在主要地震断层(SBGMF)上出现了高值异常,而 Rn 异常则向断层陡坎(OFS)偏移^[21]。

美国在爱达荷市附近进行的活动断裂地球化学探查的测项包括 H₂、CO₂、O₂、碳氢化合物和含硫类气体,得到的气体异常与推测的活动断裂分布相一致^[24]。我国已有福州和郑州等地在一些推测的活动断裂带上进行了 Hg 或 Rn 的测量,均已取得成功

的探测结果,其中在福州市进行的试验探查最为详细,18 条试验测线有意识地兼顾了条件较好的探查场地和城区道路、垃圾点(场)、回填土、废弃建筑物地基等场址。对地球化学探查与浅层地震勘探重合的 7 条测线的测量结果的对比分析说明,异常点(段)的重合率为 70%,这说明地球化学探查是一种有效的方法,但在小桥边、河边、垃圾点(场)、废弃建筑物场址容易出现 Rn 和 Hg 的“伪异常”,地下水位较高的地方,往往会出现大范围的 Rn 异常,这在工作中必须加以排除。图 5 是一条测线的地球化学和浅层地震联合剖面,在该测线上气汞异常与浅层地震勘探发现的断裂一致。

2.3 城市活动断裂探测中的地球物理勘探

城市活动断裂常为第四纪松散沉积物所覆盖,成为隐伏断裂,因此,地球物理勘探成为最主要的探测方法,常用的地球物理探测手段有地震勘探,多极直流电法勘探、探地雷达,井间地震和电磁成像及高精度重力测量等。美国的洛杉矶地震实验计划(LARSE 计划)主要是利用人工源地震及天然地震方法来获得洛杉矶地区地下直至孕震深度的结构图像,包括断层成像,特别是盲断层成像。LARSE 计划的特色是注意深浅探测的结合,以搞清这些断裂或断裂组的空间结构关系,从而判断它们作为孕震和发震断裂的可能性^[4,5]。日本的城市活动断裂探测工作更注意多种探测手段的综合运用,包括地震、

电法、重力和地脉动观测等。

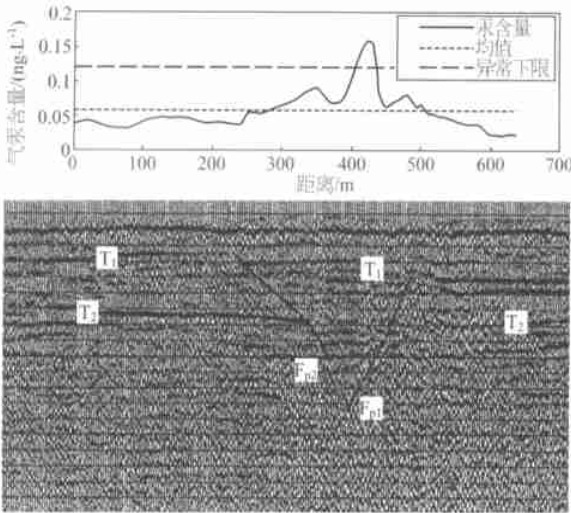


图5 一条地球化学和浅层地震联合剖面反映的断裂活动
Fig. 5 An active fault reflected by both geochemical surveying and shallow seismic prospecting

本文不可能对各种地球物理勘探方法一一作出介绍,在此,我们主要依据城市活动断裂探测的特点对其中最主要的方法,即地震勘探和多级直流电法勘探作一简单说明。

(1)浅层地震勘探:这是城市活动断裂探测中解决隐伏断裂定位及切割地层层位的最主要方法之一。包括折射波法和反射波法两种基本方法。折射波法主要利用弹性波的首波初至时间绘制成时距曲线,通过对时距曲线的解释反演来推断地下构造;反射波法则主要利用反射波相位的时空特性来推测解释地下构造,它包括有纵波和横波反射勘探两种。反射波法采用多次叠加、反褶积、谱白化等压制干扰,提高资料信噪比的技术,可以得到分辨率较高的时间剖面,从

而可以较好地推断地下构造。根据城市地质结构特点和强干扰源的类型可有针对性地选择地震勘探方法、观测系统、震源类型、地震仪器及检波器和资料处理方法,拓宽有效信号频带,提高高频分量的信噪比,以达到提高分辨率的目的^[25]。如针对城市内部不能采用爆炸震源的特点,可以采用可控震源、夯源等无破坏性地震激发源,但在郊区和规划区,当有条件时,小药量爆破源仍应为首选;灵敏度高、动态范围大和具有实时相关处理功能的地震勘探仪器是在强干扰背景条件下记录弱小高频地震信息,提高抗干扰能力及信噪比和分辨率的基础;数据采集中采用既可压制低频干扰,又可拓宽记录高频上限的高频地震检波器和涡流检波器;为了保护地震信号的高频成分,工作中采用小道间距、小偏移距接收的工作方法是提高地震资料信噪比和分辨率的有效途径;提高覆盖次数对提高资料的信噪比有利,但会降低资料的分辨率,所以,工作中对覆盖次数的选择应综合加以考虑;在数据处理中应采用各种可以提高地震资料信噪比和分辨率的处理技术,如高精度动、静校正技术、各种反褶积和谱白化技术及各种叠前、叠后去噪技术等。值得注意的是,提高地震资料的信噪比往往是以降低地震资料分辨率为代价的,所以,在城市浅层地震勘探工作中必须科学合理地解决地震资料信噪比和分辨率之间的矛盾^[26,27]。一般原则是,在闹市区,为了从强干扰背景条件下获得有效波,在数据采集和数据处理中应将提高地震资料的信噪比放在首位,兼顾地震资料的分辨率;在近郊区则应在不显著降低地震资料分辨率的前提下提高地震资料的信噪比;在远郊区或规划区,由于干扰背景相对较小,激发和接收条件较好,应把提高地震资料的分辨率作为主攻方向。图6是

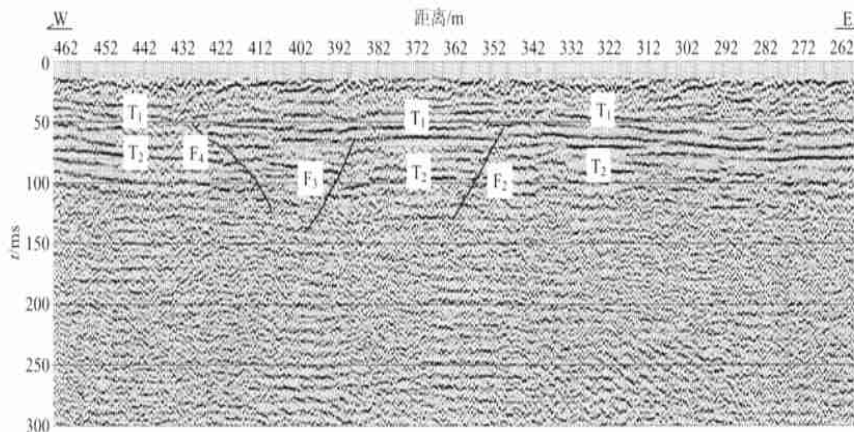


图6 浅层地震勘探的一个实例
Fig. 6 An example for a shallow seismic prospecting

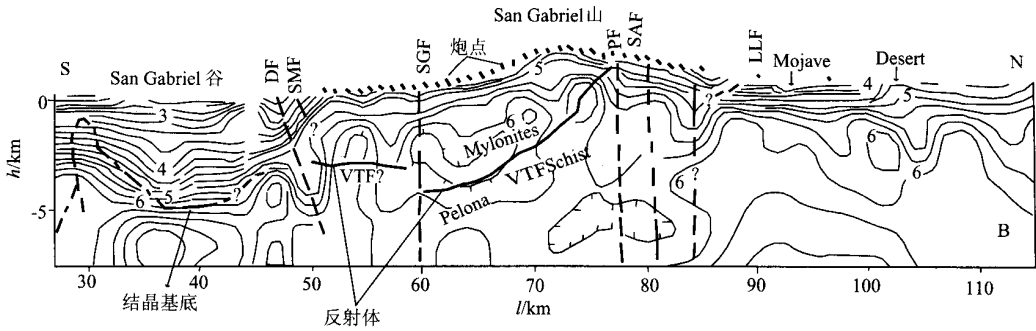


图 7 LARSE 计划地震测深剖面 LINE 1 高精度成像综合解释成果^[30]

Fig. 7 Interpretation of the high resolution imaging from seismic profile LINE 1 in LARSE project

图中粗黑虚线是解释的断裂;粗黑实线是反射体(VTF 和 VTF ?);
点-粗黑虚线为结晶基底;速度等值线数值单位为 km/s

利用可控震源在城市活动断裂探测中应用浅层地震勘探的一个实例。在测线桩号 345, 390 和 430 m 处, 两组反射同相轴 T_1 和 T_2 明显错断, 同相轴数量也有所变化, 因此认为这些桩号附近有断层存在, 断裂最新错断层位为 T_1 。

(2) 深地震探测: 只有具有一定深度的活动断裂才能孕育较大地震, 所以, 查明活动断裂的切割深度或它是否具有深部背景是重要的。因此, 在浅层地震勘探的基础上, 还应对活动断裂进行深地震探测, 其探测深度起码应达到孕震深度, 乃至达到 M 面。其主要方法包括高分辨折射成像、深地震反射剖面、宽角反射/折射剖面、三维空间地震测深以及宽频带地震台阵技术^[28, 29]。高分辨折射成像方法是根据折射波资料, 应用数学方法求解程函方程, 重建时间场, 选用适当的高分辨反演方法确定地下的速度结构和折射界面的方法。根据求解程函方程方法和反演方法的不同, 有许多高分辨折射成像方法, 如联合迭代法(LIRT 法)、最小二乘迭代法(ILST)、有限差分层析成像等^[30, 31]。高分辨折射成像方法与浅层地震勘探联合运用, 可以追踪活动断裂自近地表向基底延伸的状况, 因此, 特别有利于基底断裂的探测。图 7 是美国 LARSE 计划地震测深剖面 LINE 1 高精度初至 P 波层析成像结果。图中所揭示的断裂位置及结晶基底界面形态和深度与其他资料基本一致, 为该地区地壳模型的建立提供了很好的基础资料。

高分辨折射成像方法通常能得到 8 ~ 10 km 左右上地壳的结构图像, 深地震反射、宽角反射/折射、三维空间地震测深和宽频带地震台阵技术可以达到更大的探测深度。深地震反射方法采用较大的接收点距(50 ~ 200 m)、炮距(100 ~ 200 m)和大能量炸

药源(40 ~ 80 kg), 进行高覆盖次数叠加, 可以有效地追踪断裂向中地壳及下地壳的延伸状况^[32, 33], 它与上述浅、中层探测相结合, 可以构成由浅至深追踪活动断裂纵向分布图像的有效系统。图 8 是在延庆—怀来地区进行的深反射地震测深得到的时间剖面线划图。结果揭示了该地区上部地壳呈“透明”性质, 而下地壳具有强烈的反射性质。在官厅水库附近下地壳反射叠层明显中断, 是断裂存在的标志, 而在测线桩号 20 附近下地壳反射叠层明显中断, 是深部断裂存在的标志, 但在这个位置壳幔过渡是完整的, 表明该断裂并未延伸到莫霍面^[32]。

人工地震宽角反射/折射剖面是采用接收点距 1 ~ 5 km, 炮距数 10 km 的二维观测系统接收吨级爆破产生的地震波信号, 通过对 P_g, P_mP, P_n 时距曲线的正演拟合, 得到二维空间的结构背景。

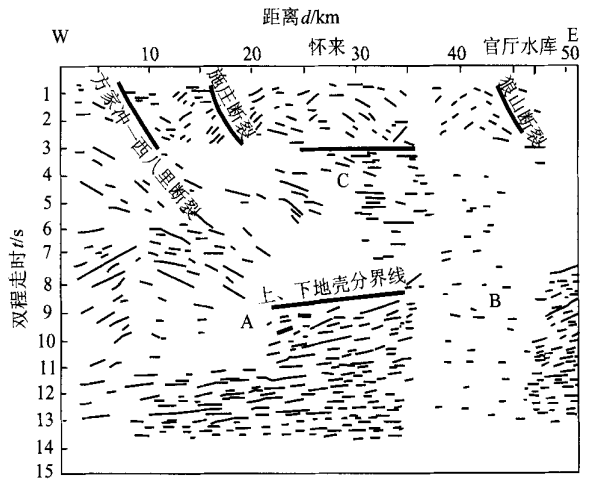


图 8 延庆—怀来深地震反射 YH-1 测线 CDP 线划图^[32]

Fig. 8 Deep seismic reflection profile along YH-1 in Yanqing-Huailai basin

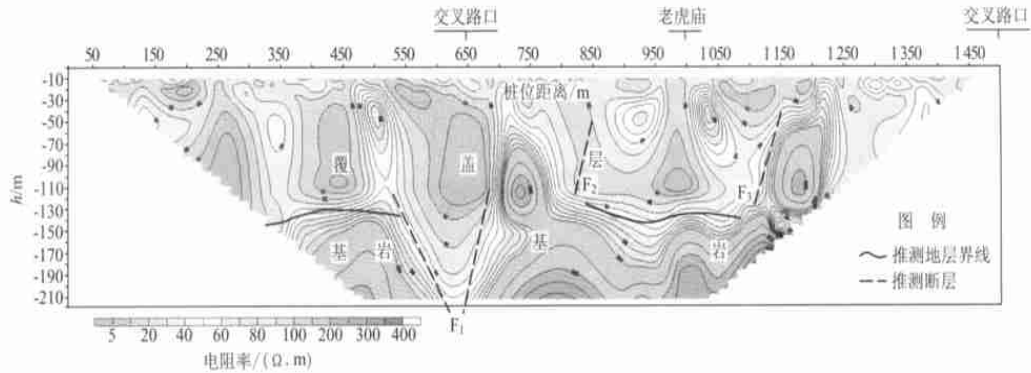


图9 多极直流电法勘探的一个实例

Fig. 9 An example by using multiple pole direct circuit electrical exploration

三维空间地震测深通过反演接收台阵所接收到的 P_g, P_mP , 获得地壳的三维速度结构背景^[34], 天然地震宽频带台阵接收技术则是利用 P 波波形数据的接收函数仅与接收台站下方速度结构有关, 而与地震波传播路途和震源性质无关的特点, 通过线性化波形反演技术拟合接收函数的径向分量, 获得接收台站下方地壳、上地幔的 S 波速度结构^[35]。本文对这些方法不再一一介绍。

(3) 多极直流电法勘探: 这是研究与地质体有关的直流电场的分布特点和规律来解决某些地质问题, 也称为高密度电法勘探或电阻率层析成像。由于这种勘探不存在振动干扰, 在浅层人工地震勘探难以开展工作的城市居民区可以起到好的作用。电极距可以小到零点几米, 也可增大到几米至十几米, 剖面长度由 20 m 至 1 200 m, 因此可对地下浅层 1 m 至 100 m 内的电性结构差异进行探测, 最大勘探深度可达 250 m 左右。多极直流电法勘探的干扰主要有外来电场的干扰, 地形的干扰和不均匀地质体的干扰等, 应尽可能增大供电电流, 避开城市工业游散电流, 加大电极入地深度, 减少接地电阻等办法来减少干扰, 并避免受到低阻和高阻屏蔽的影响。图 9 给出了一条多极直流电法勘探线的反演结果。它对覆盖层厚度和断裂等都有较好的反映, 在桩号 700 和 1 150 m 处高阻体上下连通, 认为可能是断裂的影响。

在电磁探测方法中, 除了上述多极直流电法勘探外, 还有井间电磁成像, 瞬变电磁 (TEM) 方法和地探雷达探测等, 在深部构造探测方面还有大地电磁探测 (MT) 等, 本文不再赘述。

3 结束语

城市活动断裂探测是一项复杂的, 具有创新性的工作, 是活动构造研究发展新阶段所面临的一个艰巨任务, 城市环境和人类活动的特点给这一工作带来许多困难和问题。工作中必须更多地强调和更好地做到地质地貌、地球化学和地球物理探测的结合, 做到多种探测手段和勘探方法的综合运用, 这样才能做好断裂定位、断裂活动性判定、断裂深部背景、断裂震害和位错危险性及断裂危害性评价工作, 作好和实现减灾预案, 为社会稳定和经济发展服务。

在本文的写作过程中得到陈杰、刘保金和李清林等同志的帮助, 谨致谢意。

References[参考文献]:

- [1] YEATS R S, SIEH K, ALLEN C R. *The Geology of Earthquakes* [M]. New York and Oxford: Oxford University Press, 1997. 473-485.
- [2] DENG Qidong, YU Guihua, YE Wenhua. Relationship between earthquake magnitude and parameters of surface rupture associated with historical earthquakes [J]. *Research on Active Fault*, 1992 (2) : 247-264 (in Chinese). [邓起东, 于贵华, 叶文华. 地震地表破裂参数与震级的关系研究 [J]. *活动断裂研究*, 1992 (2) : 247-264.]
- [3] HAN Zhujun, REN Fuhu, OGAWA Yujiro, et al. Research on the seismotectonics of the January 17, 1995 Hanshin M7.2 earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1996, 18 (4) : 523-528 (in Chinese). [韩竹君, 任伏虎, 小川雄二郎, 等. 1995 年 1 月 17 日日本阪神 7.2 级地震的构造条件研究 [J]. *地震学报*, 1996, 18 (4) : 523-528.]
- [4] FUIS G S, RYBERG T, GODFREG N J, et al. Crustal structure and tectonics from the Los Angeles Basin to the Mojave

- Desert, Southern California [J]. *Geology*, 2001, 29 (1) : 15-18.
- [5] FUIS G S. West margin of North America - a synthesis of recent seismic transects[J]. *Tectonophysics*, 1998, 288 :265-292.
- [6] DENG Qidong. Exploration of active faults and their seismic hazard assessments[J]. *Seismology and Geology*, 2002, 24(4) : 601-605 (in Chinese). [邓起东. 城市活动断裂探测和地震危险性评价问题[J]. *地震地质*, 2002, 24(4) : 601-605.]
- [7] DENG Qidong, FENG Xianyue, ZHANG Peizhen, et al. Active reverse fault-fold zones and earthquakes along northern Tianshan, Xinjiang, China[J]. *Seismology and Geology*, 1996, 18 (Suppl) :21-37.
- [8] NAKATA T. Study on paleoearthquakes of marine active faults [A]. SHIMAZAKI Kunihiro, OTA Yoko. *Study on Paleoearthquake* [M]. Ancient and Modern Publishing House, 1995. 168-192 (in Japanese). [中田高. 海底活断层 的古地震学的研究[A]. 岛崎邦彦, 太田阳子. 古地震を 探る[M]. 古今书院, 1995. 168-192.]
- [9] XU Xiwei, JI Fengju, YU Guihua, et al. Reconstruction of paleoearthquake sequence using stratigraphic records from drill logs: a study at the Xiadian fault, Hebei[J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22(1) : 9-19 (in Chinese). [徐锡伟, 计凤桔, 于贵华, 等. 用钻孔地层剖面记录恢复古地震序列: 河北夏垫断裂古地震研究[J]. *地震地质*, 2000, 22(1) : 9-19.]
- [10] SIEH K E. Pre-historic large earthquakes produced by slip on the San Andreas fault at Pallett Creek, California[J]. *J Geophy Res*, 1978, 83 :3907 \ | 3939.
- [11] DENG Qidong, WANG Yipeng, LIAO Yuhua, et al. Colluvial wedges and Holocene activity along the range-front fault of Helan Shan[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1984 (9) :557-560 (in Chinese). [邓起东, 汪一鹏, 廖玉华, 等. 断层崖崩积楔及贺兰山山前断裂全新世活动历史[J]. *科学通报*, 1984 (9) :557-560.]
- [12] RAN Yongkang, DENG Qidong. History, status and trend about the research of paleoseismology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(10) : 880-889 (in Chinese). [冉勇康, 邓起东. 古地震学研究的历史、现状和发展趋势[J]. *科学通报*, 1999, 44(1) :12-20.]
- [13] DENG Qidong, ZHANG Peizhen. Colluvial wedges associated with pre-historical reverse faulting paleoearthquakes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45 (17) : 1598-1604 (in Chinese). [邓起东, 张培震. 逆断层崩积楔[J]. *科学通报*, 2000, 45 (6) :650-655.]
- [14] NAKATA T, SHIMAZAKI K. Geoslicer, a newly invented soil sampler, for high-resolution active fault studies[J]. *Journal of Geography*, 1997, 106 :59-69 (in Japanese). [中田高, 岛崎邦彦. 活动断层研究: 直接从地下提取切片的装置 (Geoslicer) [J]. *地理学杂志*, 1997, 106 :59-69.]
- [15] HE Honglin, EIKICHI T, KOUICHI S, et al. Geoslicer - a new technique for detecting active fault [J]. *Seismology and Geology*, 2003, 25 (in press) (in Chinese). [何宏林, 佃荣吉, 下川浩一, 等. 大地切片 —— 一种新的活动断层探测技术 [J]. *地震地质*, 2003, 25 (待刊).]
- [16] CHEN Wenji, PENG Gui. *Age Dating to the Young Geological System* [M]. Beijing: Seismological Press, 1991. 1-297 (in Chinese). [陈文寄, 彭贵. 年轻地质体系的年代测定 [M]. 北京: 地震出版社, 1991. 1-297.]
- [17] CHEN Wenji, JI Fengju, WANG Fei. *Age Dating to the Young Geological System (Continued) - New Methods and Progress* [M]. Beijing: Seismological Press, 1999. 1-269 (in Chinese). [陈文寄, 计凤桔, 王非. 年轻地质体系的年代测定 (续) —— 新方法、新进展 [M]. 北京: 地震出版社, 1999. 1-269.]
- [18] LOMBARDI S, ETIOPE G, GUERRA M, et al. The refinement of soil gas analysis as a geological investigative technique: Conclusive results of gas migration field studies [A]. Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology. *Report EUR 16746 EN* [R]. 1996.
- [19] ETIOPE G, LOMBARDI S. Laboratory simulation of geogas microbubble flow [J]. *Environmental Geology*, 1996, 27 (3) : 226-232.
- [20] KING C Y, KING B S, EVANS W C, et al. Spatial radon anomalies on active faults in California [J]. *Applied Geochemistry*, 1996, 11 (4) :497-510.
- [21] CIOTOLI G, GUERRA M, LOMBARDI S, et al. Soil gas survey for tracing seismogenic faults: a case-study in the Fucino Basin (Central Italy) [J]. *J Geophy Res*, 1998, 103 (B10) : 23781-23794.
- [22] DEHANDSHUTTER B, BOBRO V A, HUS R, et al. Radon anomalies as evidence for activity of the Sayan fault in northern Lake Teletskoe (Gorny Altai) [J]. *Scientific Journal of Geology and Geophysics*, 2002, 43 (2) :120-133.
- [23] GUO Yixin, WU Shaowu, WANG Chengmin, et al. Analysis of the observations of fracture gases in Shanghai and its adjacent areas [A]. WANG Chengmin. *Applications of Measurement of Fracture Gases in Seismological Science* [M]. Beijing: Seismological Press, 1991. 67-74 (in Chinese). [郭一新, 吴少武, 汪成民, 等. 上海市及其邻区断层溢气测试结果分析 [A]. 汪成民. 断层气测量在地震科学中的应用 [M]. 北京: 地震出版社, 1991. 67-74.]
- [24] McCARTHY J H, KILLSGAAD T H. Soil gas studies along trans-challis fault system near Idaho city, Boise County, Idaho [J]. *U S Geological Survey Bulletin*, 1995. 2064.
- [25] WANG Zhendong. *Techniques of Shallow Seismic Exploration* [M]. Beijing: Geological Publishing house, 1988 (in Chinese). [王振东. 浅层地震勘探应用技术 [M]. 北京: 地质出版社, 1988.]
- [26] YU Shouming. *High Resolution Seismic Exploration* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993 (in Chinese). [俞寿明. 高分辨率地震勘探 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.]
- [27] TANG Jianren, LI Qinxue. *Theory and Practice of High Resor*

- lution Seismic Exploration [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001 (in Chinese). [唐建人, 李勤学. 高分辨率地震勘探理论和实践[M]. 北京: 石油出版社, 2001.]
- [28] RYBERG T, FUIS G S. The San Gabriel Mountains bright reflective zone: possible evidence of young mid-crust thrust faulting in southern California[J]. *Tectonophysics*, 1998, 286:31-46.
- [29] ZENG Rongsheng, LU Hanxing, DING Zhifeng. Seismic refraction and reflection region profilings across Tangshan epicentral region and their implication to seismogenic processes [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1988, 31 (4): 383 \ | 398 (in Chinese). [曾融生, 陆涵行, 丁志峰. 从地震折射和反射剖面结果讨论唐山地震成因[J]. 地球物理学报, 1988, 31(4):383-398.]
- [30] LUTTER W J, FUIS G S, THURBER C H, et al. Tomographic image of the upper crust from the Los Angeles Basin to the Mojave Desert, California: results from the los angeles region seismic experiment[J]. *J Geophys Res*, 1999, 104(B11):25543-25563.
- [31] DUAN Yonghong, ZHANG Xiankang, FANG Shengming. Three-dimensional finite-difference tomography of velocity structure of the upper crustal in north China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45 (3): 362-369 (in Chinese). [段永红, 张先康, 方盛明. 华北地区上部地壳结构的有限差分层析成像[J]. 地球物理学报, 2002, 45(3):362-369.]
- [32] ZHANG Xiankang, WANG Chunyong, LIU Guodong, et al. Fine crustal structure in Yanqing-Huilai Region by deep seismic reflection profiling[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1996, 39 (3): 356-364 (in Chinese). [张先康, 王椿镛, 刘国栋, 等. 延庆-怀来地区地壳细结构——利用深地震反射剖面[J]. 地球物理学报, 1996, 39(3):356-364.]
- [33] WANG Chunyong, ZHANG Xiankang, WU Qingju, et al. Seismic evidence of detachment in North China Basin [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1994, 37 (5): 613 \ | 620 (in Chinese). [王椿镛, 张先康, 吴庆举, 等. 华北盆地滑脱构造的地震学证据[J]. 地球物理学报, 1994, 37(5):613-620.]
- [34] ZHANG Xiankang, YANG Zhuoxin, YANG Yuchun, et al. Tomographic determination of 3-D crustal structure—Joint inversion of explosion and earthquake data[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1995, 17(4): 422-431 (in Chinese). [张先康, 杨卓欣, 杨玉春, 等. 地壳三维结构的层析成像方法——爆炸和地震资料的联合反演[J]. 地震学报, 1995, 17(4):422-431.]
- [35] LIU Qiyuan, LI Shuncheng, SHEN Yang, et al. Broadband seismic array study of the crust and upper mantle velocity structure beneath Yanhuai basin and its neighbouring region[J]. *Acta Geophysica Sinica* 1997, 40 (6): 763 \ | 772 (in Chinese). [刘启元, 李顺成, 沈阳, 等. 延怀盆地及其邻区地壳上地幔速度结构的宽频带地震台阵研究[J]. 地球物理学报, 1997, 40(6):763-772.]

METHODS AND TECHNIQUES FOR SURVEYING AND PROSPECTING ACTIVE FAULTS IN URBAN AREAS

DENG Qi-dong¹, XU Xi-wei¹, ZHANG Xian-kang², WANG Guang-cai¹

(1. Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China;

2. Geophysical Prospecting Center, China Seismological Bureau, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Large earthquake that occurs in the urban area may cause tremendous disaster, involving damages generated by strong ground shaking and surface rupturing along the seismogenic active fault. Therefore, it is very important to survey and prospect the active faults and concealed active faults, and to assess their seismic hazards in the urban areas. Considering these problems that most of the urban areas facing high noisy and shaking disturbance, heavy pollution and complicated surroundings, here some main methods for surveying and prospecting the active faults are introduced including geological and geomorphologic mapping as well as geochemical and geophysical prospecting methods. Geological and geomorphic mapping for latest faulting traces, and drilling and trenching for study of recent activity of the faults and paleoseismology are very important, while the age dating to the young geologic body and geomorphologic surfaces is a key technique. Geochemical prospecting, especially surveying by use of multiple geogases, is often used in the first step to locate a possible concealed active fault. Shallow seismic prospecting method will play main role among various geophysical exploration methods. Various kinds of deep seismic prospecting methods are strongly recommended to detect the deep tectonic settings of active faults which may likely induce future destructive earth-

quakes. Nevertheless, in this new task for active fault detection in the urban areas, we must emphasize and rely on the comprehensive utilization of various kinds of techniques and methods from geology, geomorphology, geochemistry and geophysics, so that we can locate active faults, and better assess the activity of the faults and their capability to generate destructive earthquake.

Key words: urban areas; active fault surveying and prospecting; methods and techniques

最新地质地理类期刊影响因子和总被引频次排序

(据中国科学技术信息研究所, 2002年12月)

名次	期刊名称	影响因子	名次	期刊名称	总被引频次
1	地质学报	1.816	1	地理学报	847
2	地理学报	1.493	2	地质论评	823
3	冰川冻土	1.469	3	地质学报	753
4	地质论评	1.249	4	岩石学报	551
5	矿床地质	1.047	5	地质科学	441
6	岩石学报	1.035	6	冰川冻土	432
7	地理研究	0.975	7	沉积学报	420
8	古地理学报	0.953	8	地理研究	415
9	地理科学进展	0.888	9	矿床地质	322
10	山地学报	0.809	10	地理科学	296
11	地质科学	0.791	11	海洋地质与第四纪地质	281
12	高校地质学报	0.691	12	山地学报	278
13	岩石矿物学杂志	0.564	13	地质科技情报	224
14	岩矿测试	0.500	14	岩矿测试	221
15	地理科学	0.473	15	现代地质	205
16	海洋地质与第四纪地质	0.466	16	地层学杂志	200
17	沉积学报	0.463	17	地质与勘探	198
18	西北地质	0.462	18	水文地质工程地质	188
19	极地研究	0.431	19	高校地质学报	181
20	地层学杂志	0.392	20	新疆地质	161
21	中国岩溶	0.350	21	石油实验地质	151
22	现代地质	0.325	22	地理科学进展	147
23	热带地理	0.316	22	中国岩溶	147
24	干旱区地理	0.309	24	矿物岩石	140
25	地质科技情报	0.303	25	地质通报	138
26	工程地质学报	0.298	26	岩石矿物学杂志	134
27	石油实验地质	0.287	27	成都理工学院学报	130
28	矿物岩石	0.262	28	干旱区地理	121
29	地理学与国土研究	0.259	29	工程地质学报	112
30	成都理工学院学报	0.251	30	地理学与国土研究	103
31	水文地质工程地质	0.225	31	热带地理	101
32	地质力学学报	0.208	32	沉积与特提斯地质	95
33	新疆地质	0.181	33	极地研究	83
33	沉积与特提斯地质	0.181	34	铀矿地质	80
35	铀矿地质	0.179	35	地质找矿论丛	67
36	地质通报	0.176	36	古地理学报	59
37	火山地质与矿产	0.175	37	西北地质	55
38	地质与勘探	0.155	38	地质力学学报	50
39	地质找矿论丛	0.102	39	华东地质学院学报	48
40	华东地质学院学报	0.093	40	火山地质与矿产	31