

第四纪盆地隐伏断层活动性的 D—T 法研究及应用^①

张 路¹, 曲国胜², 朱金芳³

(1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; 2. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049;

3. 福建省地震局, 福建 福州 350003)

摘 要:本文在跨断层钻孔勘探的基础上, 针对钻孔联合剖面提出了钻孔沉积深度—时间(D—T)分析方法。该方法以深度为纵轴、沉积时代为横轴做每一钻孔的 D—T 曲线, 分析同一钻探场地断层两侧 D—T 曲线反映的沉积速率的差别, 判断断层的活动时代和错距。该方法在福州盆地和泉州盆地的城市活断层探测项目应用得到较好的结果。最后分析了该方法的影响因素, 指出钻探场地的地形(古地形)的稳定平坦是 D—T 法的关键。

关键词: 隐伏断层活动性; 钻孔勘探; D—T 法; 福州盆地; 泉州盆地

中图分类号: P315.242

文献标识码: A

文章编号: 1000—0844(2012)02—0126—06

DOI:10.3969/j.issn.1000—0844.2012.02.0126

Research and Application of D—T Method on Determinating Activity of Buried Faults in Quaternary Basins

ZHANG Lu¹, QU Guo-sheng², ZHU Jin-fang³

(1. Institute of Dynamic Crustal Stress, CEA, Beijing 100085, China;

2. National Earthquake Response Support Service, CEA, Beijing 100049, China;

3. Fujian Earthquake Administration, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Based on drilling exploration cross faults, this paper presents Depth—Time (D—T) analysis method for compositing drilling section exploration. The method designs D—T graph (depth as Y axis, time of sediment as X axis), analyzes the defference of sedimentation speed in both sides of fault, determines the activity time and displacement of fault. The method is applied in works of urban fault exploration in Fuzhou basin and Quanzhou basin, and brings good results. At last, the influence factors to the method are analyzed, and it is considered the key factor is flatness of terrain (ancient terrain) of the drilling site.

Key words: Activity of buried fault; Exploration of drilling; D—T method; Fuzhou basin; Quanzhou basin

0 引言

隐伏断层一般位于沉积盆地或平原之内, 其活动性研究一直是一个棘手的问题。上世纪 80 年代之前, 隐伏断层的活动性研究处于方法探索与试验研究阶段。80 年代该研究逐渐展开, 进行多路探索和专题研究, 采取多学科手段综合探测研究^[1]。本世纪进行的城市活断层探测与地震危险性评价工作

开展了大量的隐伏断层活动性研究, 提出并实践了多种研究方法^[2-11]。对于断层活动性研究, 探槽开挖的研究结果比较准确和令人信服^[12], 而对于埋藏较深的隐伏断层, 浅层地震勘探和钻孔联合剖面的研究是最有效的^[13-16]。福州市的城市活断层探测与地震危险性评价作为试点项目最早启动, 其后在闽

① 收稿日期: 2010-05-14

基金项目: 福建省“十五”重点项目(48 105—02—D18)

作者简介: 张 路(1964—), 男(汉族), 黑龙江宝清人, 副研究员, 从事构造地质学研究工作。

南的泉州、漳州和厦门等城市相继开展了该项研究项目(以下均简称项目)^[17-18]。

福建沿海地区大部分出露中生代花岗岩、火山岩或其残积,少部分地区有较浅的沉积层(几十米左右),为晚第四纪的冲洪积、海积物。NE 向的长乐—诏安断裂带和一系列 NW 向断裂带控制了该区的第四纪构造活动和沉积,福建沿海城市均位于两组断裂带交汇的第四纪沉积面积较大的盆地或平原中,两组断裂带控制了盆地的形成和发展,断层多位于盆地内及周缘。对于盆地之中的隐伏断层,项目首先使用浅层地震勘探及地球化学(土壤汞、氦元素探测)等多种方法确定其准确位置,沿隐伏断层布设钻探场地,然后在断层两侧钻探、取芯,进行年代学测试,建立钻孔联合剖面,确定隐伏断层的活动性。在钻孔联合剖面中,深度和年代综合在一维的钻孔岩性柱上,不易判断其沉积速率,不便对比断层两侧的沉积速率差异。本文提出了深度—时间(D—T)分析方法,将钻孔深度和年代展开于二维平面图中,对比分析断层两侧的 D—T 曲线,确定断层的活动性,并对福建东南沿海盆地的隐伏断层进行尝试性研究。本文选取其中的福州盆地和泉州盆地的 D—T 法分析研究结果做一介绍。

1 钻孔深度—时间(D—T)分析方法

1.1 深度—时间(D—T)曲线模型的构建

沉积过程一般具有波动性,沉降时产生沉积,抬

升时会产生负沉积(剥蚀)。图 1 模拟一个典型沉积发育的深度—时间过程,以沉积年代做横轴,以沉积深度做纵轴,绘制出一组沉积深度—时间曲线(图 1(a)~(d))。

(1) 以沉积前的某一时刻为原点(时间为 0、深度为 0)开始记录沉积的深度和时间,可以得到图 1(a)曲线。曲线上任一点(t, d)表示从 0 时起,经时间 t 后,该位置的累计沉积厚度为 d 。现代钻探可能得不到所有时刻的沉积物,后来的“负沉积”将部分沉积剥蚀,如,得不到(t, d)点的沉积物。

(2) 若以现代的沉积时刻和沉积深度为坐标原点,得到图 1(b)。这条曲线可以理解为以前的历史时刻沉积所经历的沉积深度—时间路径。

(3) 该沉积位置地层中现代沉积物保存的沉积—年代过程是曲线图 1(c)的样式。历史曾经有过的沉积物现代不一定留存,它可能后来由于某种原因(地壳上升、海平面大幅下降等)被侵蚀掉了,图 1(b)中虚线以上的曲线就是这一时段的沉积记录,而在图 1(c)中这一时段显示为没有沉积的水平线。

(4) 钻孔中的沉积物年代测试反映的沉积—深度曲线如图 1(d)。如果钻孔中沉积物的测年足够多,得到的应该是类似图 1(c)的曲线,但多数情况下没有那么多的年代数据,一般在特征层位进行几个测年采样(图 1(c)曲线上的点标记),得到图 1(d)的曲线。图 1(d)所示的钻孔测年的沉积深度—年代

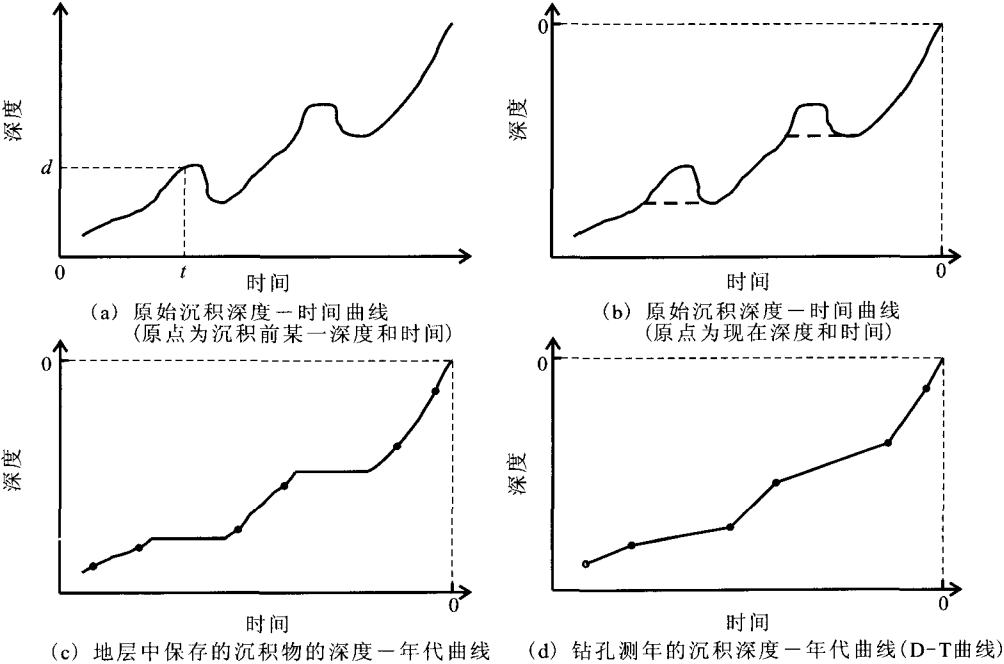


图 1 沉积深度—时间曲线

Fig. 1 The Depth—Time graphs of sedimentation.

代曲线是一般钻孔测年得到的实际 D-T 曲线。

盆地或平原中城市的内部或周围地表往往有人工改造,不是原始自然地表。福建沿海地区的盆地年代较新,是全新世沉降的地区。钻探场地是非山区、非建筑区地表,人工改造一般是填土。所以,绘制 D-T 曲线所用的沉积物深度要除去地表人工填土的深度。

1.2 D-T 沉积曲线的性质和含义

第四系沉积物测年方法以释光和¹⁴C 测年为主,该方法测得地表沉积物的年龄均为 0,即地表沉积物都是现代沉积,所以每条 D-T 曲线的终点极限坐标是(0, 0)。

D-T 沉积曲线是钻孔所在位置的沉积深度—时间变化轨迹。由于钻孔为铅垂方向,反映了沉积参数(沉积年代,沉积厚度和沉积速率等)在垂直方向上的变化;因此该曲线在应用于断层活动性研究时只能判断断层位移的垂直分量,不能判断断层走向的位移分量。

D-T 曲线几个指标的含义:

(1) 横坐标表示沉积时间,向左沉积年龄逐渐增大。

(2) 纵坐标表示沉积深度,向下方的沉积深度加大。

(3) 曲线斜率代表沉积速率,斜率越大沉积速率越大。图 1(a)和图 1(b)的曲线负斜率代表随时间沉积物被剥蚀,沉积物没有保留;图 1(c)中被剥蚀的沉积曲线显示为水平线。对比图 1(c)和图 1(d)可以发现,有沉积间断的时段 D-T 曲线的斜率较低。D-T 曲线没有负斜率。

(4) 曲线斜率改变(曲线的折拐点)代表沉积速率发生变化,一个地区普遍的统一的沉积速率改变的时代往往是沉积环境变化的时代或地壳运动发生变化的时代。福建沿海城市项目中,所有钻孔的 D-T 曲线在更新世至全新世交界处斜率均发生折拐(变大)。

1.3 D-T 沉积曲线在断层活动性探测中的应用

跨断层钻探研究在断层两侧同时进行钻孔勘探,断层两侧分别获得钻孔沉积物的 D-T 沉积曲线,对比它们的差别,可判断钻孔测年最老时代以来的断层活动性。如果断层两侧钻孔距离较近且断层没有活动,那么它们的 D-T 沉积曲线是完全一致的,应当重合;如果断层有倾向断层活动,两侧钻孔的 D-T 沉积曲线在断层活动的时段内表现为曲线斜率(代表沉积速率)不同,可以认为断层两侧钻孔

在曲线斜率不同的时段有相对运动。由于年代学测定有一定的误差,即使断层在盆地沉积时段没有活动,同一场地几个钻孔的 D-T 曲线也不一定完全重合,但几条曲线应当呈束状,表现统一的变化趋势。

徐锡伟等^[19]利用钻孔探测对夏垫断裂的古地震进行了研究。分别在右旋走滑正断层两侧相距约百米处实施了 2 个钻孔勘探,并进行了年代学测试。对比两侧钻孔沉积标志层的深度和年代,计算该断层的垂向滑移速率,并绘制沉积深度—年代图(图 2)。根据古地震事件的构造地层学标志,结合两钻孔同时代层位地层的垂直位移量随深度的变化,研究出距今 26 ka 以来发生的 11 次地表破裂型(古)地震,并将地震事件绘入深度—年代图中。在图中明显看出,在地震丛集时段两条曲线的斜率差异大;而地震稀疏时段曲线斜率差异小。表明地震事件的钻孔深度—年代分析具有一定可行性。

福建沿海盆地中的断层一般为正断层;盆地内的沉积均为晚第四系,沉积较浅(几十米),各盆地中获得的钻孔地层和年代学数据适用于 D-T 分析。项目的钻探场地范围几十米,各钻孔的沉积过程应该是一致的,如果同一场地各曲线的归一性不好,除测年误差和地形(古地形)影响,一般是断层活动引起。

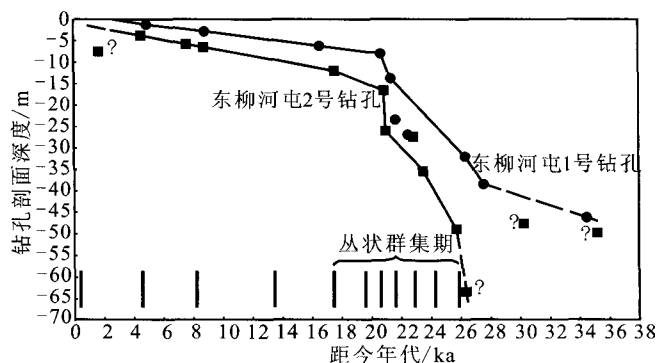


图 2 夏垫断裂上下盘钻孔深度—年代—古地震序列图(据文献[19])

Fig. 2 Graph of depth-time- paleoseismicity sequence of drilling at upside and downside of Xiadian Fault (from reference [19]).

2 福州盆地隐伏断裂的钻探 D-T 分析

福州盆地在区域断裂构造上位于长乐—诏安活动断裂带的东北端、闽江断裂带东南段,并为这两组 NNW 和 NEE 断裂所围限。区内沉积了更新世中

晚期的同安组和龙海组、全新世早中晚期的东山组、长乐组和江田组的冲洪积、海相及海陆交互相沉积。盆地周边存在着 NNW 向鼓山山前断层(F_2)和闽侯—南屿断层(F_5), NWW 向五虎山北麓断层(F_5)和 NEE 向湖头—苗圃断层(F_4), 盆地内部存在着 NNW 向八一水库—尚干断层(F_1)和桐口—洪山桥断层(F_3)隐伏断层, 均为倾向于盆地的高角度正断层(图 3)。

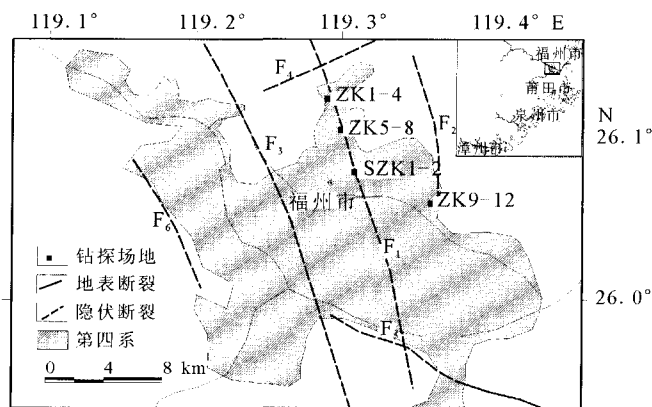


图3 福州盆地断裂、第四纪沉积和
钻探场地分布示意图

Fig. 3 Sketch map of faults, Quaternary sediment and drilling sites in Fuzhou basin.

福州盆地进行了4个场地的钻孔勘探(图3), 其中路场地的SZK1和SZK2钻孔探测第四纪地层, 建立地层剖面; 另外2个场地横跨隐伏断裂八一水库—尚干断裂: 北段八一水库南4个钻孔(ZK1, ZK2, ZK3和ZK4)和中段华林路农业科学院4个钻孔(ZK5, ZK6, ZK7和ZK8), 探测八一水库—尚干断层(F_1)的活动性; 第4个场地ZK9—12场地4个钻孔用于探测鼓山山前断层活动性。对这些钻孔进行了大量年代学测试^[17]。

对每一钻孔做沉积深度—年龄曲线, 同一场地的钻孔曲线用同样颜色(图4)。看出每个场地中的钻孔D—T曲线(同颜色)相似, 成束状组合在一起, 说明这几个场地在沉积以来钻孔间没有差异升降, 即八一水库—尚干隐伏断裂北段和中段在约56 ka(钻孔最早沉积时代)以来没有活动。另外, 鼓山山前断裂没有通过ZK9—12钻探场地^[17]。

3 泉州盆地隐伏断裂的钻探D—T分析

泉州盆地为NW向断层为主控断层的盆地, 形成于NE向长乐—诏安断裂带与NW向永安—晋江

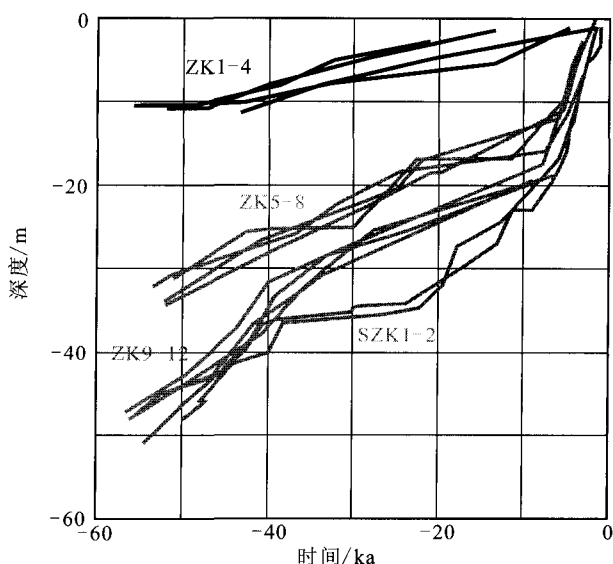


图4 福州盆地场地钻探的D—T曲线

Fig. 4 D—T graphs of drilling in Fuzhou Basin

断裂带的交汇处。盆地的第四系沉积为晚更新世的龙海组(Qp_{31})和东山组(Qp_{3d})以及全新世长乐组(Q_{hc})的冲洪积、海积。其周边发育的NE向惠安—晋江断层(F_1)和丰州断层(F_2)属于长乐—诏安断裂带主干断裂的中段; 盆地内NW向清源山山前断层(F_3)、寺角—晋江断层(F_4)和乌石山—紫帽山断层(F_5)属于永安—晋江断裂带的南东段, 均为倾向于盆地的高角度正断层(图5)。

泉州盆地布设了5个跨断层钻探场地(图5): 体育场场地(Qk1)、赤涂村场地(Qk2)、新步村场地(Qk3)、清源山场地(Qk4)和顺济桥场地(Qk5)。针对相应的断层实施钻探, 并进行了大量年代学测试^[18]。各钻孔的深度—测年D—T图见图6, 同一场地的钻孔数据用同样颜色。

体育场场地(Qk1)和清源山场地(Qk4)位于清源山断裂上, 由于每个场地仅一个钻孔有测年数据, 因此D—T法不能断定该断裂的活动性。

赤涂村场地(Qk2)跨越乌石山断裂(F_{5-1}), 开展测年的两个孔分别位于断层两侧, 孔1在下盘, 孔2在上盘(图5, 图7(a))。图6显示, 在Qk2场地20 ka前(约22~27 ka)的时段两盘发生过差异升降, 孔2所在的上盘沉积速率大于下盘孔1的沉积速率, 显示出正断层活动; 此次活动以前两孔的沉积等速、匀速, 两条D—T曲线(1和2)平直且平行, 相距2 m多; 断层活动后孔2所在上盘下降, 两条曲线重合; 其后缺少测年数据, 但曲线的趋势指向现在地表(0, 0), 按此速率一直稳定沉积, 估计再没有沉积速

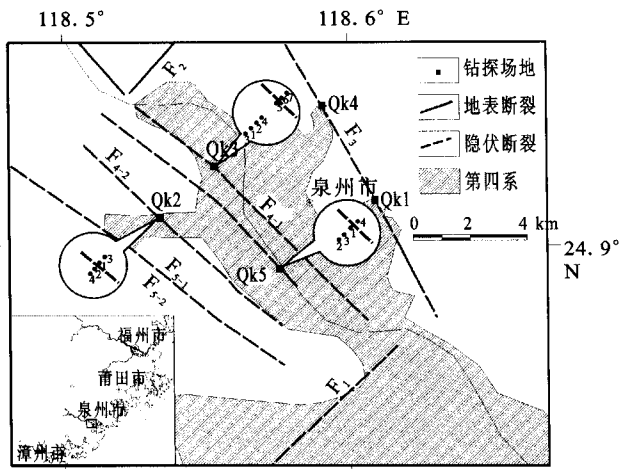


图5 泉州盆地断裂、第四纪沉积和钻探场地分布示意图(图中标注了其中几个钻探场地钻孔分布)

Fig. 5 Sketch map of faults, Quaternary sediment and drilling sites in the Quanzhou Basin (The distribution of drilling holes of several sites are mapped).

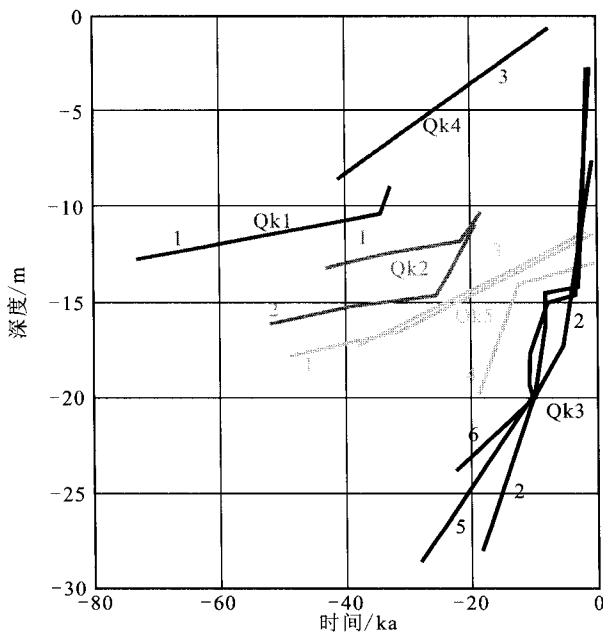
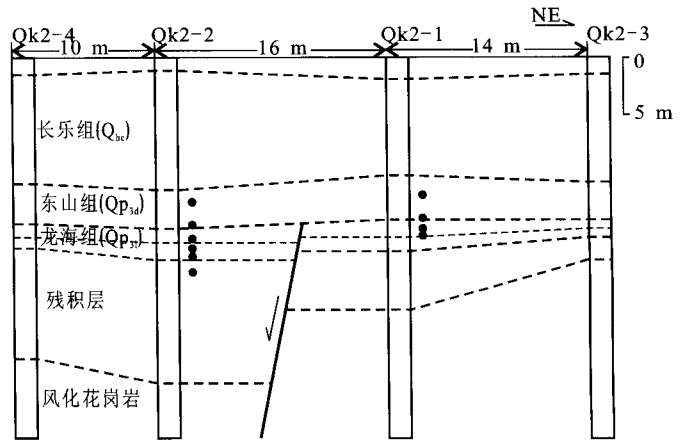


图6 泉州盆地场地钻探的D-T曲线
(数字为钻孔号)

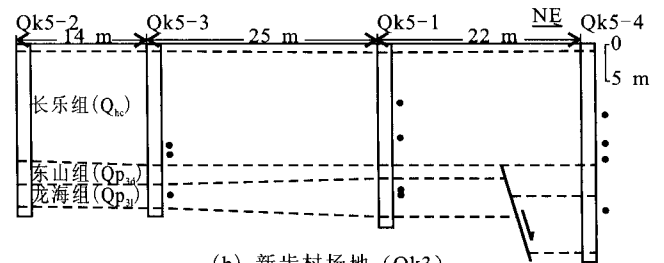
Fig. 6 D-T graph of drilling in Fuzhou basin (Number aside are hole's number).

率的突变,20 ka 以来断裂 F_{5-1} 可能不再有活动。从跨断层钻孔综合解释图示意图(图 7(a))可以看出,此次断层活动可能发生于龙海组和东山组沉积之间。

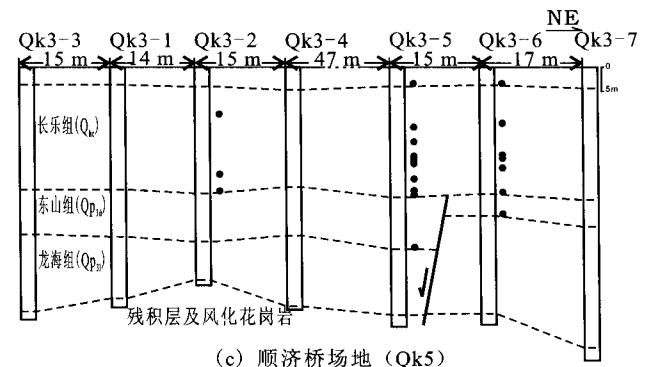
新步村场地(Qk3)钻探的目标是探测寺角—晋江断裂北支 F_{4-1} 的活动性,有 3 个测年钻孔,孔 6 和



(a) 赤涂村场地 (Qk2)



(b) 新步村场地 (Qk3)



(c) 顺济桥场地 (Qk5)

图7 泉州盆地几个钻探场地的跨断层钻孔综合解释图(修改自文献[18],钻孔柱右侧为测年采样位置)

Fig. 7 Drilling synthesis explanation of some sites in Quanzhou basin (revising from reference [18]) (chronology sampling position at right side of the column).

5 分别在断层的下盘和上盘,相距 15 m;孔 2 在距离较远的上盘上(图 5,图 7(b))。从图 6 看出孔 6 和 5 两者 D-T 曲线后期较一致,而相距远的孔 2 的 D-T 曲线有一些偏差。断层两侧孔 6 和 5 的 D-T 曲线在早期最深处的测年有差别,上盘孔 5 沉降速率大于下盘孔 6 的沉降速率,表明 10~23 ka 可能发生过正断层活动;孔 2 的 D-T 曲线表明在 10~19 ka 时期相对于孔 6 也存在正断层运动。

顺济桥场地(Qk5)钻孔探测寺角—晋江断裂南

支 F_{4-2} 的活动性,有3个测年孔,孔4在上盘,孔1和3在下盘(图5,图7(c))。从图6能看出明显的 F_{4-2} 断裂的活动性,下盘孔1和3归一性很好,较稳定,而上盘4孔的D-T曲线在13~19 ka产生快速的差异沉降, F_{4-2} 发生显著的正断层活动。

通过D-T分析认为,在泉州盆地,寺角—晋江断裂南支 F_{4-2} 在13~19 ka有正断层活动,寺角—晋江断裂北支 F_{4-1} 在10~20 ka可能发生过正断层活动,乌石山断裂 F_{5-1} 在2万年前(22~27 ka)也有正断层活动,其它断层没有发现晚更新世以来的活动。

4 D-T分析方法的评价

4.1 准确鉴定断层的活动性

断层活动的上断点、断错地层层位、位移量等分析一般采用跨断层钻孔探测的钻孔联合剖面图进行研究,在联合剖面图中可以清楚显示地层的岩性、深度等信息,一般年代学数据标示于钻孔各层位上。然而由于年代测试样品不是均匀连续的,往往在联孔对比时,不能连续进行对比,不易对比同一时间段内各个钻孔的沉积速率,因此可能使某些沉积突变的场地断层活动信息被遗漏。深度—时间分析方法(D-T法)以地层的深度和年龄数据为变量,可以清楚地揭示同时代的地层深度和同深度的地层年龄数据及关系,发现同一时间段内钻孔的沉积速率突变。如果断层两侧同一时代钻孔沉积速率存在明显的不同,表明断层在该时段有活动,使两侧沉积产生差异。

福州盆地跨断层探测所获得D-T图结果显示,八一水库—尚干隐伏断裂北段和中段在沉积以来没有活动,与福州项目所获结果吻合^[17]。

D-T分析方法利用泉州盆地的新步村场地(Qk3)和顺济桥场地(Qk5)钻探数据判断寺角—晋江断裂(F_4)的南支和北支均为晚更新世活动断裂,与泉州项目所获结果一致^[18]。赤涂村场地(Qk2)D-T分析方法显示乌石山断裂(F_{5-1})更新世晚期以来也具有一定的活动性;而在泉州项目中利用钻孔联合剖面判定时,出现了多解性,未判断断层的晚更新世活动。所以图7与文献^[18]中的Qk2场地钻剖面断层切割层位不同。

由于D-T图直观展示了钻孔的时空数据,使断层活动性判断更简捷、准确,可成为钻孔联合剖面判断断层活动性的补充方法。

4.2 D-T方法的影响因素分析

(1) 沉积环境

气候变化引起的外营力作用(风化、剥蚀、沉积等)对各场地沉积环境有着相似的影响,如福建沿海盆地长乐海侵的大范围影响,在全新世各个钻孔都表现了较高的沉积速率。钻孔场地的仅几十米范围,气候、海侵等环境造成的普遍影响对于同一场地的钻孔影响几乎是相同的。D-T方法所分析的断层两侧钻孔反映的沉积速率的差别可以认为主要是断层活动造成的。

(2) 地形

如果钻探场地处于地形(包括古地形)不平坦的位置,如河道(古河道)的位置、盆地的边部等,沉积界面的不平坦将使同一场地的钻孔获得不同深度的等时面,会产生断层活动的错觉。钻孔联合剖面研究同样存在这一问题。因此在开展钻孔D-T分析时应尽量排除地形地貌(古地形古地貌)的影响,才能准确分析断层活动产生的钻孔沉积深度和沉积速率变化。所以,钻探场地的地形(古地形)的稳定平坦是断层活动性的钻探研究的关键。

基于上述分析,在盆地较小、古地形或各沉积界面起伏复杂的情况下,需将钻孔联合剖面、三维层序地层—构造分析和钻孔深度—时间(D-T)分析相结合来进行综合分析,才能实现对复杂盆地的时空规律性的认识。较大较稳定的盆地更适于D-T法对隐伏断层活动性的研究。

[参考文献]

- [1] 向宏发,方仲景,张晚霞,等.关于平原区隐伏断裂研究的若干问题[A]//国家地震局地质研究所.现今地球动力学研究及其应用[G].北京:地震出版社,1994:271-277.
- [2] 吴建平.城市地震活断层探测的地球物理方法[J].国际地震动态,2001,(8):2-16.
- [3] 方盛明,张先康,刘保金,等.探测大城市活断层的地球物理方法[J].地震地质,2002,24(4):606-613.
- [4] 崔国柱,李恩泽,曾昭发.活动断层与地球物理方法[J].世界地质,2003,22(2):185-190.
- [5] 马文涛,徐锡伟,郝书俭,等.北京市立水桥附近黄庄—高丽营隐伏断裂的浅层地震勘探[J].地震地质,2004,26(4):698-704.
- [6] 徐明才,高景华,刘建勋,等.应用于城市活断层调查的地震方法技术[J].中国地震,2005,21(1):17-23.
- [7] 吴子泉,刘元生,刘保金,等.地球物理方法在城市地震活动断层精确定位中的应用[J].地球物理学进展,2005,20(2):528-533.

将补充或改善现有的技术,同时降低成本和风险。这些技术利用自然发生的地震或声波能量等作为震源,因此对震源定位的方法及精度研究有着重要的意义。

[参考文献]

- [1] Geiger L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from arrival time only[R]. Bull. St. Louis, Univ., 1912;60-71.
 - [2] 杨文东,金星.地震定位研究及应用综述[J].地震工程与工程振动,2005,25(1):15-25.
 - [3] 田玥,成晓非.地震定位研究综述[J].地球物理学进展,2002,17(1):148-152.
 - [4] Schuster G. Seismic interferometric imaging with waveforms [R]. UTAM Midyear Report, 1999;121-130.
 - [5] Schuster G T, Liu Z, Followill F. Migration of autocorrelation[A]// Abstracts of 67th SEG meeting[C]. 1997;1893-1896.
 - [6] Schuster G, Followill F, Katz L, et al. Autocorrelogram migration: Theory[J]. Geophysics, 2003, 68;1685-1694.
 - [7] Kapotas S, G Tselentis, M Martakis. The leap to passive seismic imaging, is it time? [A]// Expanded Abstracts of 74th Annual International Meeting SEG[C]. [S. l.]: [s. n.], 2004, 576-579.
 - [8] Maxwell S G, Urbancic T I. The Role of Passive Microseismic Monitoring in the Instrumented Oil Field[J]. The Leading Edge, 2001, 20;636-639.
 - [9] Keck R G, Withers R J. A field demonstration of hydraulic fracturing for solid waste injection with real-time passive seismic monitoring: paper SPE 28459 [A] // SPE 69th Annual Technical Conference and Exhibition of Soc. Petro. Eng. [C]. New Orleans, Louisiana; [s. n.], 1994;25-28.
 - [10] Phillips W S. Precise microearthquake locations and fluid flow in the geothermal reservoir at Soultz-sous-Forêts, France[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2000, 90, 212-228.
 - [11] Sykes L R. Earthquake swarms and sea-floor spreading[J]. Geophys. Res., 1970, 75, 6598-6611.
- *****
- (上接 131 页)
- [8] 刘菁华,王祝文,刘树田,等.城市活动断裂带的土壤氡气评价方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(2):295-304.
 - [9] 兰晓雯,晏信飞,王成虎.地震正演模拟在高分辨率隐伏断层地震勘探中的应用[J].西北地震学报,2008,30(4):354-359.
 - [10] 高景华,徐明才,荣立新,等.利用地震剖面研究夏垫断裂西南段的活动性[J].地震地质,2008,30(2):497-504.
 - [11] 卢育霞,王振明,王兰民,等.兰州盆地活断层的高分辨率浅层地震勘探技术[J].西北地震学报,2008,30(4):344-353.
 - [12] 何文贵,袁道阳,葛伟鹏,等.对兰州市刘家堡断层的新认识[J].西北地震学报,2009,31(1):40-45.
 - [13] 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.
 - [14] 李传友,汪一鹏,王志才.中国东部城市地区隐伏断裂上断点与最新活动时代关系的初步分析——以邢台—唐山地震区为例[J].地震地质,2007,29(2):431-445.
 - [15] 张世民,王丹丹,刘旭东,等.北京南口—孙河断裂晚第四纪古地震事件的钻孔剖面对比与分析[J].中国科学(D辑),2008,38(7):881-895.
 - [16] 雷启云,柴焱章,孟广魁,等.银川隐伏断层钻孔联合剖面探测[J].地震地质,2008,30(1):250-262.
 - [17] 朱金芳,徐锡伟,黄宗林,等.福州市活断层探测与地震危险性评价[M].北京:科学出版社,2005.
 - [18] 朱金芳,谢志招,曲国胜,等.闽南地区城市活动构造与地震[M].北京:科学出版社,2008.
 - [19] 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.