

银川隐伏断层钻孔联合剖面探测

雷启云¹⁾ 柴炽章^{1)*} 孟广魁¹⁾ 杜 鹏¹⁾
王 银¹⁾ 谢晓峰¹⁾ 张学辉²⁾

1) 宁夏回族自治区地震局, 银川 750001

2) 甘肃省金昌市地震局, 金昌 737100

摘 要 为获取银川隐伏断层近地表断错、上断点埋深、最新活动时代及滑动速率等信息,在浅层地震勘探基础上,沿断层自北向南横跨主断层布施了新渠梢、满春和板桥3条钻孔联合剖面,确定了主断层在3条剖面上的准确位置,获得主断层上断点埋深分别为5.18~8.30m(新渠梢)、5.01~6.50m(满春)和10.0~13.59m(板桥)。结合测年数据分析:新渠梢剖面断层全新世活动,晚更新世末期以来滑动速率为0.14mm/a;满春剖面断层也是全新世活动,但晚更新世末期以来滑动速率为0.05mm/a;板桥剖面断层全新世不活动。综合地震勘探资料进一步分析认为,以银古路为界,目标区银川隐伏断层分南北2段:北段属全新世活动断层,且自北向南活动强度呈减弱趋势,南段属晚更新世末期活动断层;北段活动强度显著大于南段。

关键词 银川隐伏断层 活断层 钻孔联合剖面 上断点 滑动速率

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2008)01-0250-14

0 引言

银川隐伏断层以NNE向隐伏于银川平原内,是构成银川地堑的一条重要构造。银川地堑是鄂尔多斯周缘一系列活动断陷盆地之一(国家地震局“鄂尔多斯周缘断裂系”课题组,1988;孟广魁等,1994)。20世纪70年代以来的石油地震勘探结果显示,地堑内存在4条规模较大的断层,其中银川隐伏断层从银川城区东部通过。但是,石油地震勘探着重于较深部位,对地下0~500m区段并未涉及,而城市规划和建设部门最关心的断层浅部准确位置和最新活动时代一直是研究的薄弱环节,影响和制约着银川市的城市建设和发展。在国家 and 地方政府的共同支持下,2004—2007年,宁夏回族自治区地震局开展了银川市活断层探测与地震危险性评价工作。银川隐伏断层被列为重点探测对象,开展了多手段多方法的综合探测活动(柴炽章等,2006)。其中,为了确定银川隐伏断层近地表错断、上断点埋深、最新活动时代及滑动速率等,先后在主断层之上布施了3条钻孔联合剖面。

20世纪90年代以来,钻孔联合剖面法已开始用于隐伏活断层探测(向宏发等,1990,1991,1993,2000),有些学者利用钻孔联合剖面法对隐伏区活动断层的古地震进行了有益的研究(徐

[收稿日期] 2007-10-22 收稿,2008-01-25 改回。

[基金项目] 国家发展和改革委员会发改投资“城市活断层试验探测”项目(20041138)资助。

* 通讯作者:柴炽章, E-mail:chai_cz@163.com。

锡伟等,2000;江娃利,2001)。“十五”期间,《中国地震活动断层探测技术系统技术规程》(中国地震局,2005)中明确将钻孔联合剖面法列为探测隐伏活断层的主要手段之一,并在有些城市取得了显著成效(徐锡伟等,2002;邓起东等,2003;朱金芳等,2005;杨晓平等,2007)。本文主要介绍银川隐伏断层钻孔联合剖面探测的结果。

1 钻孔联合剖面布置及施工方法

1.1 剖面布置

根据浅层地震勘探结果,在目标区内沿着银川隐伏断层主断层自北向南依次布置新渠梢、满春和板桥3条钻孔联合剖面(图1)。钻孔联合剖面跨断层并同浅层地震勘探测线重合或基本重合,其中新渠梢剖面重合了超浅1测线,满春剖面平行震详3测线但偏南47m,板桥剖面重合了震详7测线。3条剖面间距自北向南依次为3.5km和11.7km。

考虑到浅层地震勘探的误差和钻探区冲-湖积地层相变复杂的特点,钻孔联合剖面长设计为90m,以浅层地震解释的断层倾向和上延至地表的位置为基准点,下盘一侧的剖面端点距离基准点20~25m,上盘剖面端点距基准点65~70m。要求每条剖面钻孔数目不少于6个,关键部位的孔间距 ≤ 10 m。为确保钻探剖面揭穿晚第四纪地层,两端钻孔设计孔深80~100m,中间其它钻孔孔深视标志层深度而定。

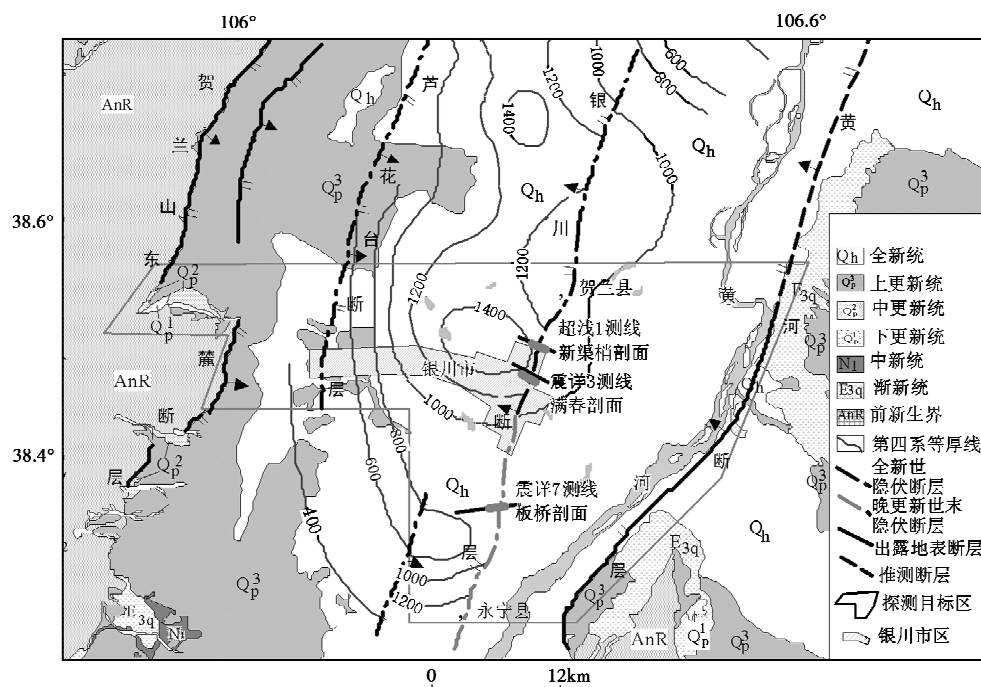


图1 目标区地质构造及钻孔剖面布置图

Fig. 1 Sketch map of geology around Yinchuan City and the position of composite drilling section.

1.2 施工方法

钻孔联合剖面探测采用由外向里逐渐逼近的施工方法:第1步在剖面两端布施2个较深的

钻孔,形成1个区间,了解区间内的地层岩性的大致分布,建立局部“标准”剖面,寻找标志地层,确定断层在该区间内;第2步在两孔间中心位置实施第3个钻孔,将区间分为2个次级区间,对比地层并推测断层所在的次级区间;第3步选断层所在次级区间之中心位置布施下一钻孔,依次类推,逐步缩小区间,直到准确判定出断层的地表准确投影位置(误差 $<2\text{m}$)和上断点埋深为止。实践表明,这种方法适合银川平原的地层特征,可避免由于浅层地震勘探定位误差而导致将钻孔过多地布于断层同盘的情况,勘探中取得了较好的效果。

针对银川平原浅层为中细砂夹黏性土的地层特点,钻探施工中回次进尺 $1\sim 2\text{m}$,允许岩心有轻微扰动,单次进尺岩心采取率:黏性土 $\geq 90\%$,中-细砂 $\geq 85\%$,粗砂 $\geq 80\%$ 。如达不到指标,则须在旁侧 1m 内补孔。厚度 $\geq 0.1\text{m}$ 地层必须编录,个别层厚 $<0.1\text{m}$ 而有标志意义的地层也需编录。剖面两端标准孔埋深 15m 以内每 1m 采1个释光样品,埋深 15m 以下每 5m 采1个释光样品,其它钻孔可根据地层岩性界线的变化灵活采样作补充; ^{14}C 样品的采集视地层埋深和含碳情况而定,凡是浅部可满足实验室测试条件的地层都予以采集,深部超过 ^{14}C 可测年限的含碳层中则不予采集。

2 钻孔联合剖面探测结果

2.1 新渠梢钻孔联合试验剖面

该剖面是银川市活断层试验探测阶段的一条试验剖面,位于银川市兴庆区新渠梢村。剖面重合地震勘探超浅1测线布置,方向 110° ,横跨于银川隐伏断层的主断层。剖面实际长 100.6m ,由9个钻孔组成,最大孔间距 18.8m ,最小孔间距 9m ,平均孔间距 11.1m ,单孔最大深度 100.10m ,最小深度 20.50m ,累计进尺 589.54m 。

2.1.1 剖面地层岩性对比

对比钻孔柱状地层岩性,新渠梢钻孔联合地质剖面地层可划分为6大层(图2),自下而上分层岩性概述如下:

层① 深灰色细砂,疏松,湿润,质地纯净,以石英长石为主,伴少量暗色矿物,偶夹黏土透镜;顶界不平整,断层东盘地层埋深 $66.15\sim 72.28\text{m}$,西盘埋深 93.93m , 100m 深未见底界;上盘相对下盘顶界落差 25.70m ;

层② 棕灰、深灰色黏砂土和砂黏土互层,夹少量粉细砂透镜;致密,潮湿,具塑性,见腐殖斑点或斑块;断层下盘顶界平缓,略向西倾,埋深 $42.05\sim 43.14\text{m}$;上盘顶界也略向西倾,埋深 $64.15\sim 65.95\text{m}$,上盘相对下盘落差为 20.34m ;

层③ 深灰色细砂,夹黏砂土和粉砂透镜,中下部含砾石;断层下盘顶界有起伏,埋深 $17.90\sim 22.11\text{m}$,上盘近水平,埋深 30m 左右,上盘相对下盘落差 9.66m ;

层④ 淡黄色细砂,顶部普遍含有小砾石,砾径 3mm 左右,棱角状、次棱角状;局部夹砂黏土、粉砂透镜体;该层顶界在下盘埋深为 $11.16\sim 13.9\text{m}$,起伏较大,形态上呈一非对称的长扁透镜状;顶界在上盘埋深 $14.32\sim 15.64\text{m}$,上盘相对下盘落差为 2.25m ;

层⑤ 浅灰色细砂,疏松,湿润,粒度均一,质地纯净,偶见中砂及粉砂透镜;顶界埋深 $2\sim 6.46\text{m}$,界面起伏较大,断层两侧无明显落差;

层⑥ 棕灰、棕黄、土黄色黏砂土和砂黏土互层,结构中密,微潮,可塑,有粘滞感;中间厚而两侧薄,顶界地表为农田改造面,无落差。

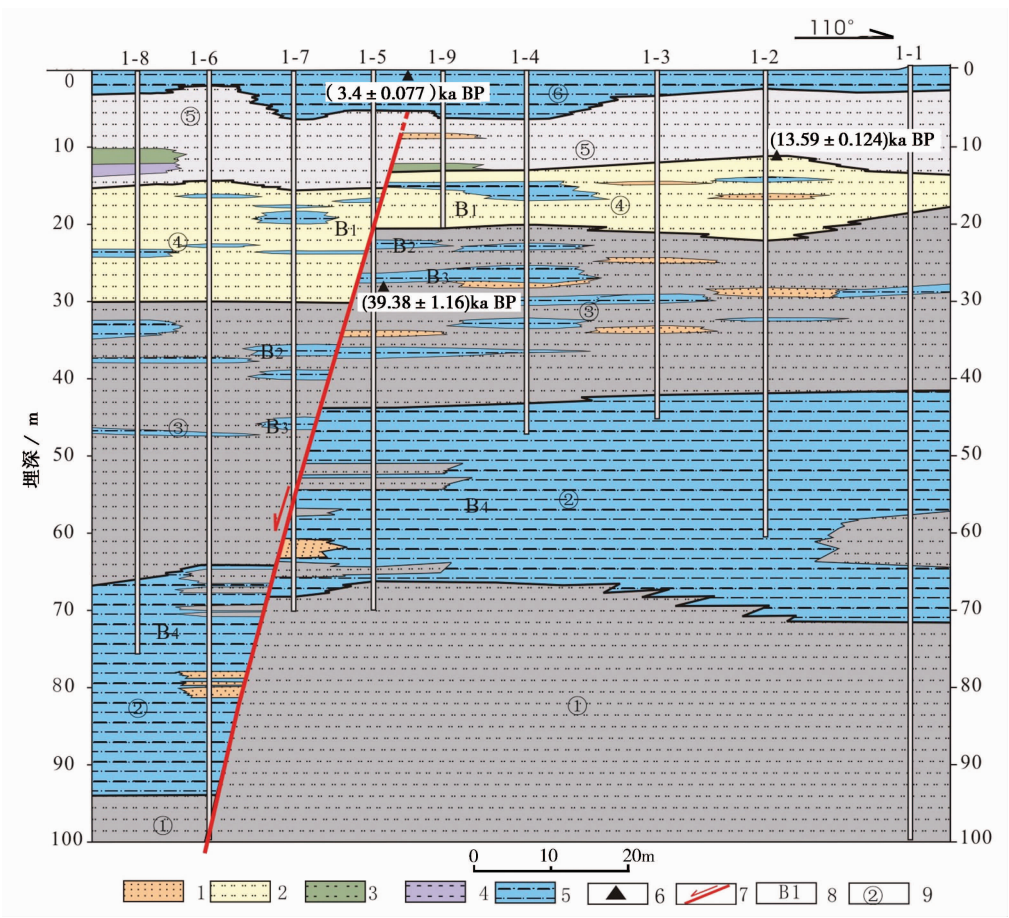


图 2 新渠梢钻孔联合地质剖面图

Fig. 2 The composite drilling geological section in Xinqushao.

1 粉砂; 2 细砂; 3 中砂; 4 粗砂; 5 砂黏土及黏砂土; 6 ¹⁴C 年龄样品; 7 断层; 8 标志地层; 9 地层编号

2.1.2 标志层及其年龄

2.1.2.1 标志层

剖面中厚度相对稳定且连续的标志层主要有 2 层:一是层②,为稳定的黏砂土和砂黏土互层(标志层编号 B4),颜色深灰、棕灰,其上下均为细砂,颜色、岩性易区别,该层顶、底界在断层两侧的落差分别为 20.34m 和 25.70m,可作为断层在该深处的垂直断距(表 1);二是层④(标志层编号 B1),岩性为细砂,但以显著的淡黄色区别于上下相邻的灰色地层,界线清晰,层位比较稳定,断层两侧顶、底界落差分别为 2.25m 和 9.66m,断错清楚、确凿。

此外,剖面上还可辨出 B2 和 B3 两个局部标志地层,均是层③深灰色细砂层中的砂黏土及黏砂土夹层,呈透镜状见于孔 1-7 和孔 1-5 中。B2 和 B3 在上盘顶界埋深分别为 35.61m、44.72m,二者在下盘顶界埋深 22.06m、26.06m,顶界落差分别为 13.55m、18.66m。B2 层显著的特点是含有小砾石,多见 10mm 左右的黏土球; B3 层也含小砾石,多见 30mm 左右的黏土球,且该层含碳质,颜色灰黑色。

表 1 钻孔联合剖面标志层断距及沉积年龄一览表

Table 1 The fault throw and dating of standard stratum of composite drilling section

名称	编号	地层岩性	上盘(下降盘)			下盘(上升盘)			断距/m	距今年龄/ka
			埋深/m	厚度/m		埋深/m	厚度/m			
新渠梢剖面	B1	淡黄色细砂	顶界	15.29	14.7	顶界	13.04	7.29	2.25	16.39 ± 0.24
			底界	29.99		底界	20.33		9.66	
	B2	黏砂土、砂黏土	顶界	35.61	1.46	顶界	22.06	1.16	13.55	
			底界	37.07		底界	23.22		13.85	
	B3	黏砂土、砂黏土	顶界	44.72	1.59	顶界	26.06	1.28	18.66	
			底界	46.31		底界	27.34		18.97	38.08 ± 1.14
	B4	黏砂土、砂黏土	顶界	64.09	29.78	顶界	43.75	24.42	20.34	
			底界	93.87		底界	68.17		25.70	95.20 ± 2.84
满春剖面	B1	黏砂土、砂黏土	顶界	10.19	2.04	顶界	9.49	2.04	0.70	13.72 ± 1.17
			底界	12.23		底界	11.53		0.70	
	B2	含砾中砂	顶界	29.84	2.45	顶界	24.5	2.02	5.34	41.29 ± 3.93
			底界	32.29		底界	26.52		5.77	
	B3	中砂	顶界	44.61	9.52	顶界	36.68	5.59	7.93	92.51 ± 9.47
			底界	54.13		底界	42.27		11.86	
	B4	黏砂土、砂黏土	顶界	77.96	0.37	顶界	63.62	0.65	—	144.95 ± 15.24
			底界	78.33		底界	64.27		14.06	
	B0	中砂	上覆层,底界埋深 5.01m						0	
板桥剖面	B1	黏砂土、砂黏土	顶界	14.17	2.44	顶界	13.59	1.92	0.58	43.48 ± 6.98
			底界	16.61		底界	15.51		1.10	
	B2	黏砂土、砂黏土	顶界	27.30	8.99	顶界	26.2	8.67	1.10	96.70 ± 16.71
			底界	36.29		底界	34.87		1.42	
	B3	中砂	顶界	41.38	1.32	顶界	39.55	1.16	1.83	146.79 ± 25.37
			底界	42.70		底界	40.71		1.99	
	B4	细砂	顶界	69.74	—	顶界	63.45	—	6.29	247.40 ± 42.76

需要特别说明的是,由于严格的采岩心取样要求,钻孔 1-7 在 55.27m 深处,采得一段含断层面的完整岩心,该段岩心被断层斜切为二,斜面(断面)以上为深灰色细砂,因松散无法保留原始楔形,斜面以下为砂黏土,结构致密,完整地保留了断面的原始形态,砂黏土段岩心呈“楔状”。通过测量,获取的岩心断面倾角为 71°,为利用上述标志地层判断断层提供了最直接的证据。

2.1.2.2 标志层沉积年龄推算

剖面中有 3 个可用¹⁴C测年结果:其中 1 个样品采于上覆层埋深 0.85m 处,年龄为(3.40 ± 0.077)ka BP,其它 2 个样品采于断层下盘 11.2 和 28.2m 深处,年龄分别为(13.59 ± 0.124) ka BP 和(39.38 ± 1.160)ka BP^①。基于银川平原第四系厚度巨大和新生代以来持续下沉的事实,假设在计算年代范围内地层连续沉积,以上 3 个年龄值为基础,通过内插和外延推算标志层近似沉积年龄:埋深 <28.2m,由内插推算;埋深 >28.2m,由外延求取。由此获取的主要标志层沉积年龄见表 1。

2.1.3 断层最新活动时代及滑动速率

2.1.3.1 最新活动时代

新渠梢剖面层①~④均被错断,断距自下而上依次减小,断层倾角 71°,上断点位于孔 1-5 和 1-9 之间,两孔间距 9m。层⑤底界被错断,顶界虽无明显落差,但断层投影线附近有上凸现象,因而,不排除错动或砂土液化的可能。限于钻孔间距和钻探分辨精度,这里初步将层⑤顶底界定为上断点上限和下限,即断层上断点5.10~8.30m 之间,断层地表投影在孔 1-5 东侧 4.5 (±1)m 处。根据内插推算,上断点埋深地层年龄为(7.59 ± 0.10)~(10.74 ± 0.11)ka BP。所以,新渠梢场点钻孔联合地质剖面解释的银川隐伏断层是全新世活动构造。

2.1.3.2 滑动速率

根据标志层垂直断距和沉积年龄得到的(95.20 ± 2.804)ka BP 以来不同时段断层垂直位移及滑动速率列于表 2。从表 2 中可以看出:晚更新世早-中期,断层垂直位移 6.73m,滑动速率 0.12mm/a;晚更新世晚期断层活动有所增强,垂直位移 16.72m,滑动速率增大至 0.77 mm/a;晚更新世末以来,断层活动水平相对减弱,垂直位移 2.25m,滑动速率减小至 0.14mm/a。

表 2 银川隐伏断层晚第四纪不同时期断层垂直位移及滑动速率					
Table 2 Yinchuan buried fault throw and slip rate during different phases of late-Quaternary					
剖面名称	距今时段/ka	时段长/ka	垂直位移/m	滑动速率/mm·a ⁻¹	地质年代
新渠梢剖面	16.39 ± 0.24 至今	16.39	2.25	0.14	晚更新世末至今
	16.39 ± 0.24 ~ 38.08 ± 1.14	21.69	16.72	0.77	晚更新世晚期
	38.08 ± 1.14 ~ 95.20 ± 2.84	57.12	6.73	0.12	晚更新世早-中期
满春剖面	13.72 ± 1.17 至今	13.72	0.70	0.05	晚更新世末至今
	13.72 ± 1.17 ~ 41.29 ± 3.93	27.57	4.64	0.17	晚更新世晚期
	41.29 ± 3.93 ~ 92.51 ± 9.47	51.22	6.52	0.13	晚更新世早-中期
板桥剖面	10.57 ± 0.97 至今	10.57	—	—	晚更新世末至今
	10.57 ± 0.97 ~ 43.48 ± 6.98	32.91	1.1	0.03	晚更新世晚期
	43.48 ± 6.98 ~ 96.70 ± 16.71	53.22	—	—	晚更新世早-中期

2.2 满春钻孔联合剖面

该剖面位于银川市兴庆区丽景街东侧满春村 5 队,北距震详 3 地震勘探测线 47m,以 117°方向横跨银川隐伏断层。剖面长 100m,由 8 个钻孔组成,最大孔距 30m,最小 9m,平均 12.5m。

① 本文¹⁴C和释光样品均由中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室测试。

单孔最大深度 85.90m,最小深度 42.21m,总进尺 518.05m。

2.2.1 剖面地层岩性对比

地层以砂性土为主,黏性土分布极少。横向上地层岩性变化颇大,相变复杂(图3)。综合对比,将剖面地层归并为4 大层,自下而上简述如下:

层① 青灰色,局部灰黑色细砂;下盘岩性较单一,主要为细砂,夹黏砂土薄层及中砂、粉砂透镜体;顶部及中部含砾,顶界埋深42.85~43.11m;上盘岩性复杂,以细砂夹中砂为主,见粉砂、黏砂土薄层,中部含砾石,顶界埋深53.35~54.46m,上盘相对下盘落差 11.86m;

层② 深灰、黑灰色,向下渐为青灰色中砂;下盘顶、底部为含砾中砂,中部为细砂,夹粉砂、中砂镜体,顶界埋深24.29~24.46m;上盘以中砂为主,夹粗砂、细砂及粉砂透镜,普遍含砾;顶界埋深28.85~30.94m,上盘相对下盘落差 5.34m;

层③ 淡黄、深灰色细砂、中砂;下盘以细砂为主,夹中-粗砂和粉砂等透镜或薄层;上盘底部细砂夹粉砂、黏砂土,顶部含砾中砂夹粗砂、黏砂土透镜;顶界埋深3.99~5.89m,断层两侧顶界无落差;

层④ 杂色砂黏土及黏砂土互层,底部含细砾,中密一致密,含腐殖质。

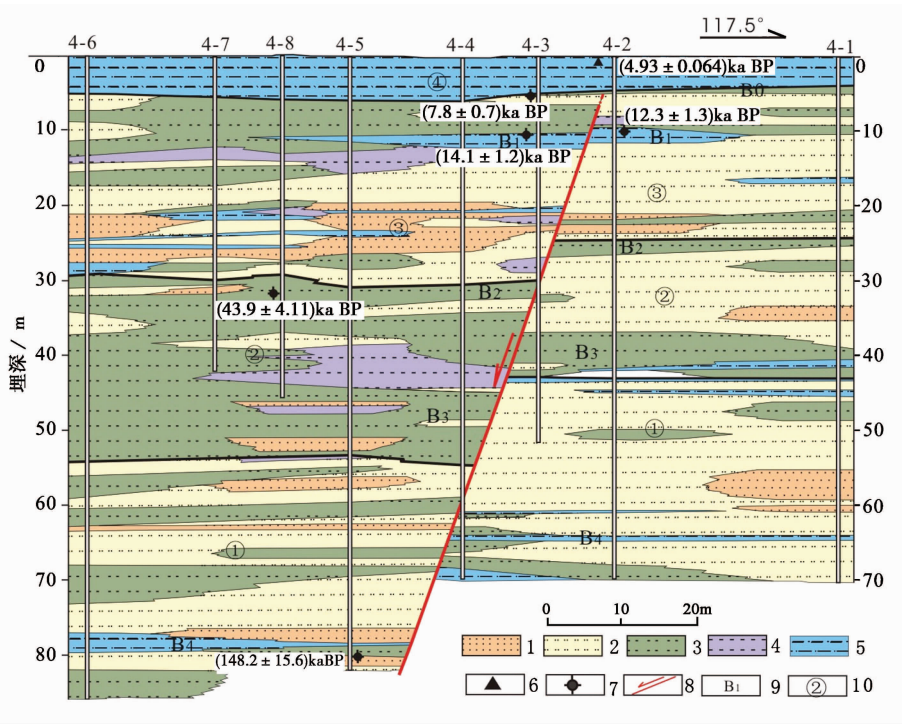


图 3 满春钻孔联合地质剖面图

Fig. 3 The composite drilling geological section in Manchun.

1 粉砂; 2 细砂; 3 中砂; 4 粗砂; 5 砂黏土及黏砂土; 6 ¹⁴C样品; 7 光释光样品; 8 断层; 9 标志地层; 10 地层编号

2.2.2 主要标志地层及沉积年龄

2.2.2.1 标志地层

尽管满春剖面横向上相变显著,但仔细分析,还是发现了 5 个小层可做标志(表 1)。

标志层 B1: 为层③上部细、中砂中的砂黏土透镜, 以含棕红色黏土薄层显著区别于上下砂层。上盘见于 4-8、4-5、4-4 及 4-3 四孔之中, 顶、底界埋深分别为 10.19 和 12.23m; 下盘仅见于 4-2 孔, 顶、底界埋深分别为 9.49 和 11.53m。两盘顶、底界断距 0.7m。上盘孔 4-3 中 10.5m 深处样品释光年龄为 (14.1 ± 1.2) ka BP, 下盘孔 4-2 中 10.0m 深处样品年龄 (12.3 ± 1.3) ka BP;

标志层 B2: 为层②顶部含砾中砂层, 见于所有钻孔, 顶、底界埋深在上盘分别为 29.84 和 32.29m, 下盘分别为 24.5 和 26.52m, 断距分别为 5.34m 和 5.77m; 顶界为从粗变细的岩相分界, 以普含小砾石而区别于上下地层;

标志层 B3: 为层②底部中砂, 见于所有钻孔, 上盘顶、底界埋深分别为 44.61 和 54.13m, 下盘分别为 36.68 和 42.27m, 断距分别为 7.93m 和 11.86m; 底界为从细到粗的岩相界线, 以含 2~6mm 棱角状砾石和 10mm 左右黏土球区别于上下地层;

标志层 B4: 为层①细砂中的薄层黏砂土、砂黏土夹层, 各孔均有分布, 顶、底界埋深上盘为 77.96 和 78.33m, 厚度不稳定; 下盘为 63.62 和 64.27m, 厚度稳定; 底界断距 14.06m; 以黏性土和含灰黑色碳质层区别于上下砂层;

标志层 B0: 为层③顶部的含泥、砾中砂薄层, 底界埋深 5.01m, 厚 0.4m 左右, 见于孔 4-1、4-2、4-3 中, 上为地表黏性土层, 下为纯净细砂, 界线清楚, 特征明显; 该层顶、底界面无明显错断位移, 是判断上断点的重要标志。

2.2.2.2 标志层沉积年龄推算

根据年龄样品测试结果, 上覆地层埋深 0.75m 处的样品 ^{14}C 年龄为 (4.93 ± 0.064) ka BP, 上盘埋深 10.5, 31.7, 79.83m, 3 处样品光释光年龄分别为 (14.1 ± 1.2) ka BP、 (43.9 ± 4.11) ka BP 和 (148.2 ± 15.6) ka BP。利用上述年龄数据, 通过内插求得标志层 B0 至 B4 的沉积年龄 (表 1)。

2.2.3 断层最新活动时代及滑动速率

2.2.3.1 最新活动时代

图 3 显示, 断层视倾角 71° , 上断点位于孔 4-2、4-3 之间, 两孔间距 10m。B1 标志层被断层错断, B0 标志层顶界覆盖了断层。因而, 初步判定断层上断点埋深应处于 B1 和 B0 之间, 即埋深在 5.01~9.49m 之间。进一步对比两盘 5.01~9.49m 段地层, 发现断层以西主要是中砂, 以东底部为粗砂和中砂, 中-上部为细砂, 只有顶部两侧均为细砂层。据此推测该层沉积时的大多数时段断层仍有活动, 至少错断了该层中-上部的中砂 (顶界埋深 6.50m), 上断点埋深应该在 5.01~6.50m 之间, 断层地表投影在孔 4-3 东侧 $8.5 (\pm 1)$ m 处。通过内插推算, 求得上断点埋深范围内地层沉积龄为 $(7.62 \pm 0.66) \sim (9.25 \pm 0.82)$ ka BP。因而, 满春剖面揭示的断层与北侧新渠梢剖面一样, 均属全新世断层。

2.2.3.2 滑动速率

利用标志层的垂直位移及其沉积年龄, 求取了满春剖面 (92.51 ± 9.47) ka BP 以来 3 个时段的断层垂直位移及滑动速率 (表 2)。结果显示, 晚更新世早-中期, 断层位移 6.52m, 滑动速率 0.13mm/a; 晚更新世晚期, 断层垂直位移 4.64m, 滑动速率稍大, 为 0.17mm/a; 晚更新世末以来, 垂直位移 0.70m, 断层滑动速率减小, 仅为 0.05mm/a。

2.3 板桥钻孔联合剖面

该剖面位于永宁县望远镇板桥村 6 队,与地震勘探震详 7 测线重合。剖面全长 89.4m,以 81.5°方向横跨于银川隐伏断层之上,由 6 个钻孔组成,最大孔间距 44.6m,最小孔间距 8m,单孔最大深度 80.04m,最小深度 37.71m,总进尺 388.02m。

2.3.1 剖面地层岩性对比

与北侧 2 个剖面相比,板桥剖面地层分布比较规律,易于地层岩性对比划分。综合剖面岩性资料,可分为 7 大层(图 4)。自下而上分述如下:

层① 深灰或青灰色细砂,下盘上部夹黏砂土及中砂薄层。断层上下两盘顶界面平缓,其中上盘埋深 69.88~70.27m,下盘顶界埋深 61.57~61.62m,上盘相对下盘落差 8.7m;

层② 深灰或青灰色中、细砂互层,夹深灰、棕灰和棕红色砂黏土薄层和透镜;上盘顶界埋深 36.30~36.68m,下盘埋深 31.88~35.03m,上盘相对下盘落差 1.42m;

层③ 深灰或棕灰、棕红色砂黏土、黏砂土互层;上盘顶界埋深 26.73~27.38m,下盘埋深 24.91~25.58m,上盘相对下盘落差 1.10m;

层④ 上部浅灰色,下部深灰色,岩性比较复杂;上盘以细砂为主,下部夹中砂透镜,上部见薄层或透镜状砂黏土;下盘底部东侧为中砂,向西相变为黏砂土。中部为细砂,上部为砂黏土及黏砂土;上下两盘顶界埋深分别为 14.20~15.64m 和 13.65~15.18m,上盘相对下盘落差 0.58m;

层⑤ 浅灰或深灰色中砂,夹少量细砂小透镜;顶界在断层附近比较平整,埋深 9.69~10.28m,西侧(上盘)略高于东侧(下盘);

层⑥ 细砂,上部淡黄、向下渐变为浅灰色;顶界平整,埋深 5.18~5.56m;断层上、下盘间无明显落差;

层⑦ 土黄、土灰色砂黏土和黏砂土互层,下部夹粉砂薄层,为近地表层;顶、底界面平直,厚度稳定,结构中密或微密,胶结较好,表层富含植物根系,见虫孔。

2.3.2 主要标志地层沉积年龄

2.3.2.1 主要标志层

板桥剖面中作为断层错断的标志性地层有 4 层(表 1)。其中 2 层砂黏土,2 层砂性土。

标志层 B1 为层④顶部的黏砂土和砂黏土透镜夹层,以含次棱角砾石和炭线为主要特点。上盘仅见于断层附近 3-4 和 3-6 孔,顶、底界埋深分别为 14.17 和 16.61m,内夹细砂;下盘连续分布,见于 3-1 和 3-3 孔中,顶、底界埋深 13.59~15.51m。顶、底界落差分别为 0.58m 和 1.10m。3-6 和 3-3 两孔间距 14m,该层顶、底界落差若是沉积时的地层本身不平整所造成,那么顶、底界落差应该相等或相近,但顶、底界落差不一致,却符合同沉积断层两侧同一地层底界断距大于顶界的特点,而且在该层以下地层很杂乱,单纯依赖沉积作用难于解释,类比前两剖面断层的上断点埋深考虑,该层落差由断层引起的可能性极大,从偏安全的角度考虑,认为断层错断了该标志层。

标志层 B2 即为层③黏性土,是本剖面的最主要的标志层。上下地层区别明显,厚度稳定,见于所有钻孔中。上盘顶、底界埋深分别为 27.30 和 36.29m,下盘顶、底界埋深分别为 26.2 和 34.84m。顶界断距 1.10m,底界 1.42m。

标志层 B3 为层②中的中砂夹层,分布稳定,见于所有钻孔。上盘顶、底界埋深分别为

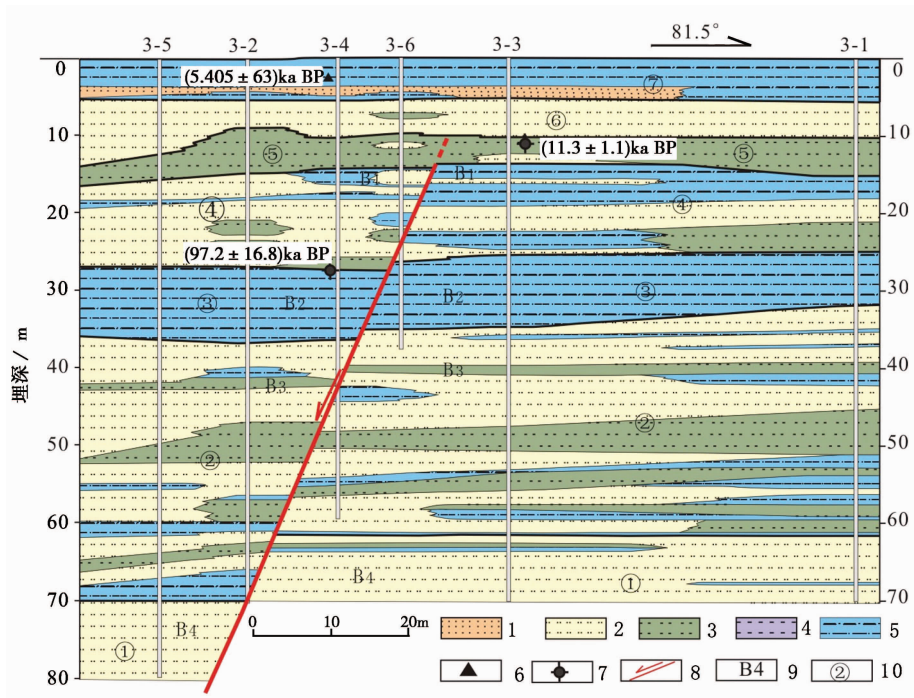


图 4 板桥钻孔联合地质剖面

Fig. 4 The composite drilling geological section in Banqiao.

1 粉砂; 2 细砂; 3 中砂; 4 粗砂; 5 砂黏土及黏砂土; 6 ^{14}C 样品; 7 光释光样品; 8 断层; 9 标志地层; 10 地层编号

41.38 和 42.70m,下盘顶、底界埋深分别为 39.55 和 40.71m,顶、底界断距分别为 1.83m 和 1.99m。该层以含小砾石、且夹于粒度均匀的细砂之中为主要特征。

标志层 B4 即为层①细砂层。整体上看,该层为稳定的黑灰色细砂,其上地层粗细颗粒交替变化,且以青灰色为主,因此上下差异比较明显,易于区别。

2.3.3.2 标志层沉积年龄推算

板桥剖面中,获取了 3 个可用年龄样品的测试结果:第 1 个是埋深 3.0m 处的 ^{14}C 样品,测年结果为 $(5.405 \pm 0.063)\text{ka BP}$;第 2 个是取自下盘 11m 深处的光释光样品,结果为 $(11.300 \pm 1.100)\text{ka BP}$;第 3 个是取自上盘 27.4m 处的光释光样品,结果为 $(97.200 \pm 16.800)\text{ka BP}$ 。利用这 3 个数据进行内插和外延,推算了各标志层的沉积年龄,结果列于表 1。

2.3.3 断层最新活动时代及滑动速率

2.3.3.1 最新活动时代

图 4 显示,断层视倾角为 66° ,上断点居于孔 3-3 和 3-6 之间,两孔间距 14m。层⑤底界被断层错断,有 0.58m 的断距落差,顶界以及上覆层⑥平缓无明显落差。因此,断层上断点应限于层⑤之中,即上断点埋深在 10.00 ~ 13.59m,断层地表投影在孔 3-6 东侧 $5.8(\pm 1)\text{m}$ 处。根据内插年龄数据,得知层⑤沉积年龄从 $(3.679 \pm 5.67)\text{ka BP}$ 开始,到距今 $(10.57 \pm 0.97)\text{ka}$ 结束,因此可以推测,断层的最新活动时代为晚更新世晚期到末期,全新世没有活动。

2.3.3.2 滑动速率

利用标志层的断距及其内插年龄数据,计算得到了晚更新世期间 2 个时段的断层垂直位移

和滑动速率(表2)。结果显示,断层晚更新世总体活动很弱,其中晚更新世早-中期,断层活动没有发生明显的断错活动;晚更新世晚期断层有过微弱活动,在32.91ka时段内,垂直位移1.1m,滑动速率0.03mm/a。此后,再未见错动。

3 结论与讨论

(1)对比3条钻孔联合剖面的探测结果,不难看出:位于银川隐伏断层主断层北段的新渠梢剖面 and 满春剖面无论是断层倾角还是最新活动时间,都基本一致,二者倾角均为 71° ,最新活动时间亦同为全新世,上断点埋深也相近,前者为5.18~8.30m,后者5.01~6.50m;而处于南段的板桥剖面与前二者明显不同,该处断层倾角 66° ,上断点埋深10.0~13.59m,最新活动时代为晚更新世末。结合浅层地震勘探分析,认为银川隐伏断层以银古路为界,可分为南北2段,北段属全新世断层,南段为晚更新世晚期-末期断层。

(2)从表2列出的滑动速率分析,晚更新世早-中期,银川隐伏断层整体活动水平较低,其中北部新渠梢和满春场点断层活动速率仅0.12~0.13mm/a,南部板桥场点更是未见错动;晚更新世晚期,断层活动有所增强,其中新渠梢场点增大最显著,速率达0.77mm/a,满春略有增加,为0.17mm/a。南部板桥场点虽有活动,但较北部而言,滑动速率低一个数量级;晚更新世末期以来,断层活动又趋于减弱,北部新渠梢和满春场点分别减小至0.14mm/a和0.05mm/a。南部板桥场点断层停止活动。总之,3条钻孔联合剖面中,无论同期断层活动强度,还是不同时期累计位移,新渠梢场点都表现出高值,满春次之,板桥最低。新渠梢和板桥的差异主要是因为所处段落不同,满春与新渠梢同处在北段,它们的差异是因为同一段落内不同部位而引起,前者已近段落端点。由于受可用测年数据的限制,通过内插和外延方法计算得出的不同时期断层的近似滑动速率和实际滑动速率间有一定的出入,特别是较早时代出入更大一些。但是对同一断层不同时代的活动强度对比仍然有重要意义。

(3)较之浅层地震勘探的多解性和不确定性,钻孔联合剖面法直接揭示地层,可准确地给出断层的位置,定位准确性明显提高。但钻孔联合剖面对断层成功定位的前提必须以浅层地震勘探结果为基础,只有这样才能有的放矢。保证钻孔联合剖面法对断层定位有效性的另一前提涉及到钻探的整个过程。首先,岩心采取率是根本,采取率低将遗漏地层信息,地层对比结果脱离实际,断层定位也就无从谈起;其次,动态信息化施工是关键,根据由外向里逐渐逼近的施工方法,在现场钻探的同时,将探测结果实时地反馈于室内分析人员,绘制大比例尺(1/100)钻孔联合地质剖面,始终把握银川隐伏断层为生长断层的特征,对比和确定标志地层,然后决定下一钻孔的位置和深度。在银川平原的场地条件下,钻孔联合剖面钻孔数应至少为6个,方能控制断层位置,最小孔间距也应 $\leq 10\text{m}$ 为宜。

(4)银川隐伏断层是典型的生长断层,同一地层在断层上盘地层厚度明显大于下盘,而且在理论上,断层上盘一直处于接受沉积的状态,保留地层应当比较完整,下盘存在的地层应该能与上盘对应。然而,银川隐伏断层上的3条钻孔剖面所反应的事实并非如此,许多在断层下盘存在的地层,在上盘无法对应,表现为断层附近一些地层莫名其妙地缺失,与生长断层的事实不相符。究其原因,黄河在断层两侧非同步沉积以及动荡冲刷起了重要的作用。一方面,河流相地层不同于海湖相地层,由于其特殊的水动力条件,其横向上同一时间的沉积地层并不相同,剖面中大量的透镜状地层屡见不鲜,相变非常复杂;另一方面,河流在沉积作用的同时还存在冲

刷作用,特别是河道摆动的时候,会强烈地冲刷阻挡其前进的河岸,而断层的活动又加剧了河流冲刷的复杂性。关于黄河对银川隐伏断层的每次活动是如何响应的,还是尚待研究的问题。这里所要说明的是,正是由于黄河动荡沉积冲刷和断层活动二者的共同作用,塑造了银川隐伏断层附近复杂而又独特的地层关系。

参 考 文 献

- 国家地震局“鄂尔多斯周缘活动断裂系”课题组. 1998. 鄂尔多斯周缘活动断裂系 [M]. 北京:地震出版社.
- The Research Group on Active Fault System around Ordos Massif, SSB. 1998. Active Fault System around Ordos Massif [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 孟广魁,王增光,廖玉华,等. 1994. 银川平原地震区划研究 [M]. 银川:宁夏人民出版社.
- MENG Guang-kui, WANG Zeng-guang, LIAO Yu-hua, *et al.* 1994. Yinchuan Plain Earthquake Regionalization Research [M]. Ningxia People's Press, Yinchuan (in Chinese).
- 柴炽章,孟广魁,杜鹏,等. 2006. 隐伏活动断层的多层次综合探测:以银川隐伏活动断层为例 [J]. 地震地质, 28(4):536—544.
- CHAI Chi-zhang, MENG Guang-kui, DU Peng, *et al.* 2006. Comprehensive multi-level exploration of buried active fault: an example of Yinchuan buried active fault [J]. Seismology and Geology, 28(4):536—544 (in Chinese).
- 向宏发,方仲景. 1990. 北京平原区隐伏断裂的探测研究 [A]. 见:国家地震局编. 中国地震年鉴. 北京:地震出版社.
- XIANG Hong-fa, FANG Zhong-jing. 1990. Exploration study of buried faults in the Beijing Plain area [A]. In: State Seismological Bureau (ed). China Earthquake Yearbook. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 向宏发,方仲景,张晚霞,等. 1991. 南口—孙河断裂活动性的初步研究 [A]. 见:国家地震局编. 中国地震年鉴. 北京:地震出版社.
- XIANG Hong-fa, FANG Zhong-jing, ZHANG Wan-xia, *et al.* 1991. Preliminary study of Nankou-Sunhe Fault activities [A]. In: State Seismological Bureau (ed). China Earthquake Yearbook. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 向宏发,方仲景,张晚霞,等. 1993. 北京平原区隐伏断裂晚第四纪活动性的初步研究 [J]. 地震学报, 15(3):385—388.
- XIANG Hong-fa, FANG Zhong-jing, ZHANG Wan-xia, *et al.* 1993. Preliminary study of late Quaternary activities of buried faults in the Beijing Plain area [J]. Acta Seismologica Sinica, 15(3):385—388 (in Chinese).
- 向宏发,王学潮,魏顺民,等. 2000. 聊城—兰考隐伏断裂第四纪活动性的综合探测研究 [J]. 地震地质, 22(4):351—359.
- XIANG Hong-fa, WANG Xue-chao, GUO Shun-min, *et al.* 2000. Integrated survey and investigation on the Quaternary activity of the Liaocheng-Lankao buried fault [J]. Seismology and Geology, 22(4):351—359 (in Chinese).
- 邓起东,徐锡伟,张先康,等. 2003. 城市活断层探测的方法和技术 [J]. 地学前缘, 10(1):150—162.
- DENG Qi-dong, XU Xi-wei, ZHANG Xian-kang, *et al.* 2003. Methods and techniques for surveying and prospecting active faults in urban areas [J]. Earth Science Frontiers, 10(1):150—162 (in Chinese).
- 朱金芳,徐锡伟,黄宗林,等. 2005. 福州市活断层探测与地震危险性评价 [M]. 北京:科学出版社. 246—278.
- ZHU Jin-fang, XU Xi-wei, HUANG Zong-lin, *et al.* 2005. Active faults exploration and seismic hazard assessment in Fuzhou city [M]. Science Press, Beijing. 246—278 (in Chinese).
- 江娃利. 2001. 北京平原夏垫断裂潘各庄钻孔晚更新世晚期以来古地震事件分析 [A]. 见:中国地震局地质研

究所编. 活动断裂研究(8). 北京:地震出版社. 140—147.

JIANG Wa-li. 2001. Paleoearthquake analysis of the Xiadian Fault since the late period of late Pleistocene epoch from Pangezhuang boring in Beijing Plain [A]. In: Institute of Geology, CSB(ed). Research on Active Fault(8). Seismological Press, Beijing. 140—147(in Chinese).

徐锡伟, 计凤桔, 于贵华, 等. 2000. 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, 22(1): 9—19.

XU Xi-wei, JI Feng-ju, YU Gui-hua, *et al.* 2000. Reconstruction of paleo-earthquake sequence using stratigraphic records from drill logs: a study at the Xiadian Fault, Beijing [J]. Seismology and Geology, 22(1): 9—19(in Chinese).

徐锡伟, 吴为民, 张先康, 等. 2002. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震 [M]. 北京: 科学出版社. 118—127.

XU Xi-wei, WU Wei-min, ZHANG Xian-kang, *et al.* 2002. Latest tectonic movement in the crust and earthquakes in the region around capital [M]. Science Press, Beijing. 118—127(in Chinese).

中国地震局. 2005. 中国地震活断层探测技术系统技术规程 [S]. 北京: 地震出版社.

China Earthquake Administration. 2005. Stipulation on Technical System for China Earthquake Active Fault Surveying [S]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).

杨晓平, 郑荣章, 张兰凤, 等. 2007. 浅层地震勘探资料地质解释过程中值得重视的问题 [J]. 地震地质, 29(2): 1—11.

YANG Xiao-ping, ZHENG Rong-zhang, ZHANG Lan-feng, *et al.* 2007. Some problems worth considering in the geological explanation of shallow seismic prospecting data [J]. Seismology and Geology, 29(2): 1—11(in Chinese).

COMPOSITE DRILLING SECTION EXPLORATION OF YINCHUAN BURIED FAULT

LEI Qi-yun¹⁾ CHAI Chi-zhang¹⁾ MENG Guang-kui¹⁾ DU Peng¹⁾

WANG Yin¹⁾ XIE Xiao-feng¹⁾ ZHANG Xue-hui²⁾

1) *Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China*

2) *Earthquake Administration of Jinchang of Gansu Province, Jinchang 737100, China*

Abstract

This paper introduces the result of exploration of the Yinchuan buried fault using the composite drilling section method. As one of the main buried faults in Yinchuan plain, the Yinchuan buried fault has restricted seriously the development of Yinchuan City for a long time due to its indistinct location and unclear activity property. So the Yinchuan buried fault was taken as one of main tasks of active fault exploration in Yinchuan City. Most of shallow seismic explorations had been done before the drilling. However, due to the limited precision of shallow seismic exploration, the actual location of the Yinchuan buried fault can't be explored. For obtaining the information about the location and the depth of the upper break point, the active time and slip rate of the Yinchuan buried fault, three composite drilling sections, Xinqushao, Manchun and Banqiao, were laid out along the Yinchuan Fault based on the result of shallow seismic exploration. After comparing with the marker horizons disclosed by drilling, the position, scale and the depth of the upper break point of Yinchuan buried fault were found, and the buried active fault was located precisely. From the exploration result we get the apparent dip of the Yinchuan buried fault as 71 degrees at Xinqushao, 71 degrees at Manchun and 66 degrees at Banqiao, and the depth of the upper break points as 5.18 ~ 8.30m, 5.01 ~ 6.50m and from 10.0 ~ 13.59m, respectively. Therefore, the latest active date of the Yinchuan buried fault is determined and the question whether the fault is active or not is answered by dating. The Yinchuan buried fault at Xinqushao and Manchun sections is manifested as a Holocene active fault, and at Banqiao, it is shown as a late Pleistocene active fault. The slip rate of the Yinchuan buried fault since late Pleistocene is 0.14mm/a at Xinqushao, 0.05mm/a at Manchun and 0mm/a at Banqiao. Based on the result obtained from seismic exploration and the spatial positions of the three composite drilling sections, we draw the following conclusions: the Yinchuan buried fault can be divided into two segments with Yingu Road as the boundary; the northern segment was active in Holocene and the southern one was active in late Pleistocene; the activity of the northern segment is more recent than that of the southern one.

Key words Yinchuan buried fault, active fault, composite drilling section, upper break point, slip rate

〔作者简介〕 雷启云,男,1981年生,2005年毕业于兰州大学地质工程专业,获工学硕士学位,工程师,现主要从事活动构造研究工作,电话:0951-5068227, E-mail: leiqr624@163.com。