

西宁湟水河隐伏断裂发育模式探讨

李智敏¹ 张进² 田勤俭^{3,4} 张军龙⁴ 屠泓为¹

(1.青海省地震局,青海 西宁 810001;2.中国地震局地质研究所,北京 100029;
3.中国地震灾害防御中心,北京 100029;4.中国地震局地震预测研究所,北京 100036)

摘要:近些年来一些地震表明,强震不仅发生在地表出露的活动断裂上,还发育在一些隐伏的未出露地表的构造上。大陆内部块体间的变形带不只是一条活动断裂,而是具有很大宽度的构造变形带,这已被大量的地震活动性资料所证实。因此,要正确评估地震危险性,就要研究构造带上地层变形的模型,而不仅是单条断裂的变形。湟水河隐伏断裂为一条隐伏在西宁市的断裂,位于西宁盆地中部,长12 km,走向EW,浅层地震探测结果表明该断裂由两条正断层组成地堑式构造,横跨西宁地区的地层剖面研究结果指出湟水河隐伏断裂发育在宽缓背斜的核部,而宽缓的背斜和向斜由新近系红色泥岩组成。根据褶皱与断裂的关系认为,湟水河隐伏断裂为在北东向的区域主压应力作用下,褶皱变形过程中,在背斜的核部伴生形成的次级张性地堑式正断层。该褶皱及相关断裂发育在西宁盆地滑脱面之上,属于浅表性的断层,活动性不显著。

关键词:湟水河隐伏断层;褶皱变形;断裂发育模式;西宁

中图分类号: P542⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2009)06-1245-06

对中国大陆内部地壳变形的描述常有两种动力学模型。第一种为微板块模型,即构造变形集中分布在一些主要构造带上,在构造带围限的构造块体内变形微弱;第二种为连续变形模型,即构造变形相对均匀地分布在大陆内部散布的断层上^[1]。中国大陆内部地震破裂的空间分布表明,强震主要分布在一些主要的构造带上,在构造带围限的区域内,地震活动相对较弱。因此,对于中国大陆内部的地震活动,第一序次应符合微板块模式。但微板块内部并非刚性,内部仍有构造变形,仍有断裂发育。因此,大陆内部构造变形图像由不同层次断裂系统构成。

断层是岩层或岩体顺破裂面发生明显位移的构造,断层常常构成一定地区的构造格局。在挤压构造区,推覆构造和褶皱是普遍发育的构造形式。近些年来一些事实表明,强震不仅仅发生在地表出露的活动断裂上,还发育在一些隐伏的未出露地表的构造上。如在美国西部的加州地区,强震除沿一些主要

断裂如 San Andreas 断裂、San Simeon 断裂发生外,还发生在断裂带外部的隐伏构造上,且破裂性质与主断裂滑动方式不同^[2]。一些中等强度的地震和一些小地震也分布在宽度更大的范围内。这说明大陆内部块体间的变形带不只是一条活动断裂,而是具有很大宽度的构造变形带,这已被大量的第四纪地质及地震活动性资料所证实。因此,要正确评估地震危险性,正确认识第四纪变形特征,就要研究构造带上地层变形的模型,而不仅仅是单条断裂。

西宁市位于湟水(西宁)盆地中部的 NW 向湟水河谷地之中,在区域拉脊山挤压逆冲构造带的边缘。在 NEE 向区域主压应力的作用下,造成盆地褶皱变形和断裂活动。据历史记载,西宁市附近发生 10 多次 5 级左右地震,历史地震与该断裂的相互关系仍是十分值得探讨的问题。故本文以西宁市湟水河隐伏断裂为例,通过区域地层变形和深部资料分析,试图对该断层的发育模式与地震危险性进行讨

收稿日期:2009-03-07;改回日期:2009-10-26

基金项目:中国地震局地质研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(GB-07-20)、中国地震局地震科学基金(A08068)项目资助。

作者简介:李智敏,男,1977年生,助理研究员、硕士,主要从事活动构造与工程地震方面的研究;E-mail:minhero_168@126.com。

论。

1 西宁市构造环境和主要断裂

西宁盆地是位于青藏高原北部的中生代盆地。新近纪以来,在印度板块向北推挤作用影响下,该盆地经受北东-南西向水平挤压,形成了北西西方向的新生界宽缓褶皱及次一级的为数众多的小型短轴褶皱。影响盆地内部变形的盆缘断裂带主要有

热水-日月山断裂带、拉脊山断裂带、达坂山断裂带和大通断裂(图1)。热水-日月山断裂带位于西宁盆地西部,该断裂第四纪以来有明显的左旋走滑活动^[4];拉脊山断裂带位于西宁盆地南缘,晚更新世以来仍有活动迹象^[9],卫片显示左旋走滑和挤压活动特征;达坂山断裂带是西宁盆地北部达坂山南缘附近发育的左旋走滑断裂带,卫片显示一些地段水系断错,具有明显的左旋走滑活动特征;大通断裂位于西宁盆

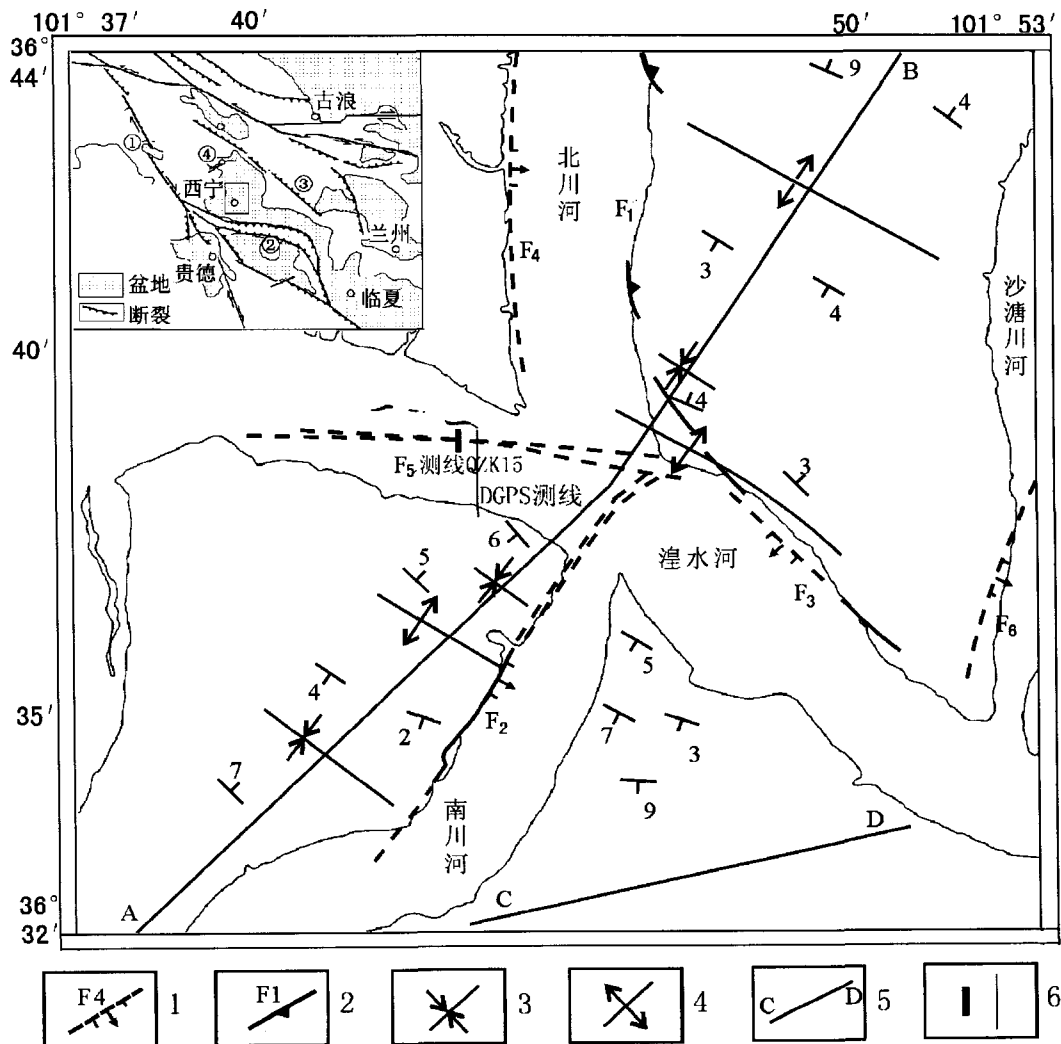


图1 西宁盆地活动构造分布图

1—隐伏不活动正断层;2—实测活动逆断层;3—背斜轴;4—向斜轴;5—剖面位置;6—测线位置;
F₁—北川河东岸断裂;F₂—南川河断裂;F₃—湟水河隐伏断裂;F₄—北川河西岸断裂;F₅—湟水河北岸断裂;
F₆—沙塘川河断裂;①—日月山断裂;②—拉脊山断裂;③—大坂山断裂;④—大通断裂

Fig.1 The distribution of active faults in Xining basin

1—Concealed inactive normal fault; 2—Measured active reverse fault; 3—Anticline axis; 4—Syncline axis; 5—Section location; 6—Traverse location; F₁—Beichuan River east bank fault; F₂—Nanchuanhe fault; F₃—Huangshui River concealed fault; F₄—Beichuan River west coast fault; F₅—Huangshui River north bank fault; F₆—Shatangchuan River fault; ①—Riyue Mountain fault; ②—Laji Mountain fault; ③—Daban Mountain fault; ④—Datong fault

地西北,走向 NE。沿断裂带可见基岩逆冲于第四系之上,断层泥研究显示中更新世具有明显活动^[6]。

活断层探测结果显示^[7],在西宁市目标区范围内发育 6 条断裂(图 1),这 6 条断裂分别为北川河东岸断裂、沙塘川河断裂、南川河断裂、北川河西岸断裂、湟水河北岸断裂及湟水河隐伏断裂。

2 湟水河隐伏断层结构及活动特征

湟水河隐伏断裂为一条隐伏在西宁市的断裂,位于西宁盆地中部,长 12 km,走向 EW,仅在彭家寨以西切入基岩区。野外调查表明,在张家湾一带,断层构成山前高台地与山麓洪坡积带的分界,高 15 m 的冲沟阶地由含砾黄土构成,超覆于桔红色新近纪泥岩之上,无断错迹象。在彭家寨镇布设一条浅层地震测线(QZK15),勘探结果(图 2)表明,该断层发育在新近系泥岩中,由两条正断层构成地堑式构造,断错新近纪地层约 5 m,断层上覆连续稳定的第四

纪沉积物,厚约 10 m。断层上覆地层为河流相沉积物,测年结果为 $(16.8 \pm 2.0) \text{ka}$,上部为洪坡积相黏土,测年结果为 $(13.2 \pm 1.4) \text{ka}$ ^[8]。

为了研究断层的地貌特征及活动性,利用 DGPS 技术进行了高精度阶地测量,测线位置见图 1。工作过程中采用两台南方 9600 型仪器组成后差分系统进行数据采集,并由随机的软件进行处理,在小于 100 km 范围内进行测试表明,相位平滑伪距差分定位的精度可达亚米级,随着距离的缩短,精度会更高^[9,10]。通过野外 DGPS 地貌面及阶地地面的精细测量,测线内共发育湟水河 II 级和 III 级阶地。II 级阶地拔河高度 30 m,III 级阶地拔河高度 60 m,从地貌面(图 3)上可以看出,断层发育在湟水河 II 级阶地中部。通过阶地区域对比,该断层未控制湟水河 III 级阶地的发育,III 级阶地形成年代为 0.12 Ma^[11],笔者认为该断层晚更新世以来没有活动。

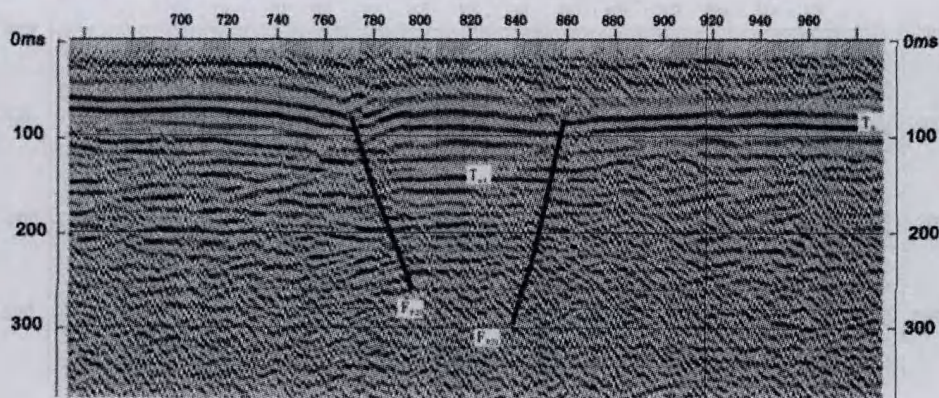


图 2 湟水河隐伏断层浅震勘探结果图

Fig.2 Shallow seismic survey result of Huangshui River concealed fault

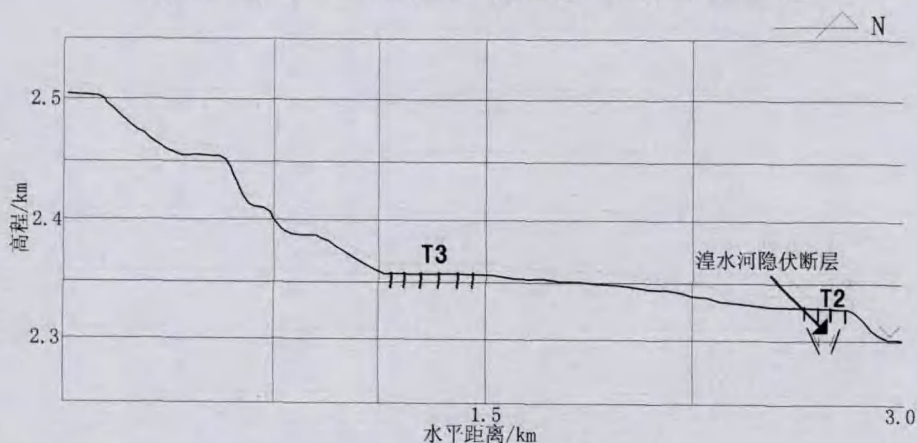


图 3 湟水河隐伏断层及横剖面图

Fig.3 Huangshui River concealed fault and horizontal section

3 地层变形与断裂发育模式

通过对单层纵弯曲的应变状态及内部的小构造的分析认为,当单一岩层或彼此粘结很牢成为一个整体的一套岩层受到侧向挤压形成纵弯时(图4-a),在不同部位可能产生一系列有规律分布的内部小构造。如岩层韧性较高,外凸侧会因拉伸而变薄,内凹侧则因压缩而变厚(图4-b);如为较脆性的岩层,在外凸侧常产生与层面正交、呈扇状排列的楔形

张节理或小型正断层(图4-c),或在一定条件下(如微层理发育)内凹侧可能发生小褶皱。

湟水河隐伏断裂发育在西宁构造盆地的中部NNW向湟水河河谷之中。西宁盆地内新近系红色泥岩普遍褶皱变形(图5),形成宽缓的背斜与向斜,这一系列褶皱轴向呈NW向,两翼倾角较小,最大不超过 10° 。湟水河断裂发育在背斜的核部,物探资料揭示断裂带由两条断裂构成张性地堇式构造,因此认为在NEE向区域挤压应力作用下,西宁地区新

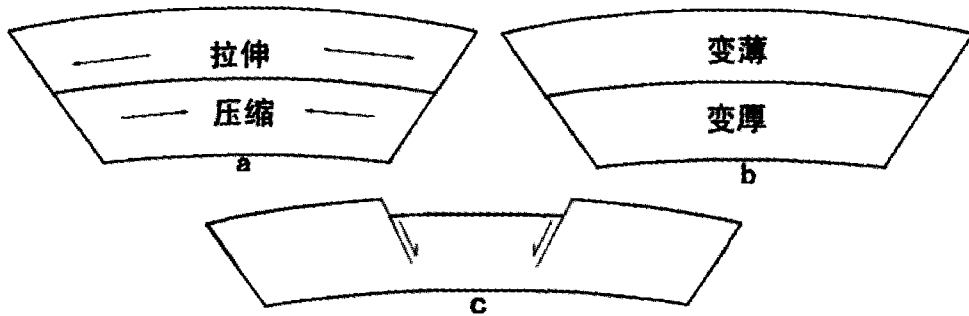


图4 单层纵弯曲的应变状态及内部的小构造

a—纵弯曲的应变状态;b—韧性层的变形;c—脆性层的断裂变形

Fig.4 Strain state of the monolayer longitudinal bending and internal tiny structure

a—Longitudinal bending strain state; b—Deformation of ductile layer; c— Fracture deformation of brittle layer

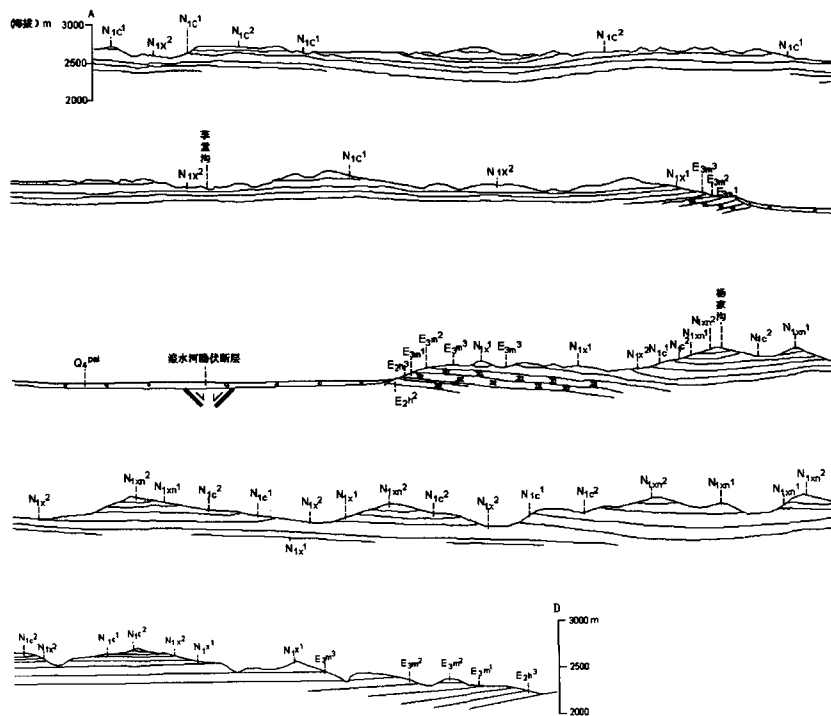


图5 A-B地质剖面略图

Fig.5 Sketch geological section of A-B

近系红色泥岩褶皱变形, 在背斜的顶部形成了近EW向的湟水河隐伏断层, 该断层的发育符合脆性层的断裂变形模式。

4 讨论

湟水河隐伏断裂为发育在西宁市湟水河南岸的一条隐伏断裂, 物探资料显示该断裂由两条正断层构成地堑式的构造, 钻探显示该断层面上覆第四系厚约10 m, 断裂断错新近系地层5 m左右; 第四纪地层沉积厚度变化不大, 为连续稳定的沉积层, 第四系下部的河流相地层沉积年代为 $(16.8 \pm 2.0) \text{ ka}$; 通过野外DGPS地貌面及阶地地面的精细测量结果认为, 断裂位于湟水河Ⅱ级阶地中部, 未控制湟水河Ⅲ级阶地的发育, Ⅲ级阶地形成年代为0.12 Ma, 该断层晚更新世以来没有活动。

西宁盆地是由西南部的日月山断裂、拉脊山断裂和北部的达坂山南缘断裂围限的新生代盆地。盆地在近NE向挤压应力下, 受上述边界断裂活动控制, 盆地内部发生褶皱变形, 根据西宁地区平衡剖面研究结果^[12], 目标区内褶皱变形滑脱面位于4~5 km附近, 向南缓倾。结合沉积盖层的厚度为4~5 km分析, 褶皱变形主要卷入沉积盖层, 并沿沉积盖层的底部滑脱。笔者认为湟水河隐伏断层为沉积盖层在褶皱变形过程中背斜顶部形成的张性地堑式正断层, 该断层的发育符合脆性层的断裂变形模式。

湟水河隐伏断裂发育模式表明, 西宁盆地在新近纪遭受过持续的挤压变形, 造成一系列褶皱并伴随有断层活动。历史上西宁盆地内部发生过6次5级以下地震, 没有关于该断裂地震活动性的记载。物探显示该断层切割深度浅、规模小, 未来不会发生超过6.0级地震。

参考文献(References):

- [1] Microplate versus continuum descriptions of active tectonic deformation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100 (B3): 3885-3894.
- [2] William R. Lettis, Donald L. Wells, John N. Baldwin. Empirical observations regarding reverse earthquakes, blind thrust faults, and quaternary deformation: Are blind thrust faults truly blind [J]? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997, 87: 1171-1198.
- [3] 田勤俭, 丁国瑜, 申旭辉. 青藏高原东北隅强震构造模型[J]. *地震*, 2002, 22(1): 9-16.
Tian Qinjian, Ding Guoyu, Shen Xuhui. Seismic tectonic model of the northeastern corner of the Tibet Plateau [J]. *Earthquake*, 2002, 22(1): 9-16 (in Chinese with English abstract).
- [4] 袁道阳, 刘小龙, 张培震, 等. 青海热水-日月山断裂带的新活动特征[J]. *地震地质*, 2003, 25(1), 155-166.
Yuan Daoyang, Liu Xiaolong, Zhang Peizhen, et al. Characteristics of the modern activity of the Reshui-Riyueshan fault zone in Qinghai Province [J]. *Seismology and Geology*, 2003, 25 (1), 155-166 (in Chinese with English abstract).
- [5] 袁道阳, 张培震, 雷中生, 等. 青海拉脊山断裂带新活动特征的初步研究[J]. *中国地震*, 2005, 21(1), 93-102.
Yuan Daoyang, Zhang Peizhen, Lei Zhongsheng, et al. A preliminary study on the new activity features of the Lajishan mountain fault zone in Qinghai Province [J]. *Earthquake Research in China*, 2005, 21(1): 93-102 (in Chinese with English abstract).
- [6] 李智敏, 田勤俭, 姚生海, 等. 青海大通断裂带初步研究 [J]. *地震地质*, 2007, 29(4): 856-862.
Li Zhimin, Tian Qinjian, Yao Shenghai, et al. A preliminary study on datong fault belt [J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(4): 856-862 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李智敏, 田勤俭, 高占武, 等. 西宁城市活动断裂地表特征初步研究[J]. *地震*, 2005, 25(4): 119-126.
Li Zhimin, Tian Qinjian, Gao Zhanwu, et al. Study of the surficial features of the active faults in Xining City [J]. *Earthquake*, 2005, 25 (4): 119-126 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王萍, 苏旭, 田勤俭, 等. 西宁市北川河西岸断层、湟水河断层活动性的钻探研究[J]. *震灾防御技术*, 2007, 2(2): 147-157.
Wang Ping, Su Xu, Tian Qinjian, et al. Drill data analysis on activities of huangshuihe fault and Beichuanhe west fault in Xining City [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2007, 2(2): 147-157 (in Chinese with English abstract).
- [9] 杨永平, 兰孝奇, 夏开旺, 等. GPS相位平滑伪距差分定位技术的试验研究[J]. *工程勘察*, 2006, (2): 52-56, 45.
Yang Yongping, Lan Xiaoqi, Xia Kaiwang, et al. Experimental study of GPS phase smoothing pseudorange differential positioning technology [J]. *Journal of Geotechnical Investigation & Surveying*, 2006, (2): 52-56, 45 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张军龙, 田勤俭, 张小龙, 等. DGPS方法在新构造研究中的应用探讨[J]. *地学前缘*, 2008, 15(4): 290-297.
Zhang Junlong, Tian Qinjian, Zhang Xiaolong, et al. The applications of DGPS method in neo-tectonic research [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(4): 290-297.
- [11] 张军龙, 田勤俭, 李智敏, 等. 西宁盆地浅层滑脱面与地震关系探讨[J]. *地震*, 2008, 28(1): 114-120.
Zhang Junlong, Tian Qinjian, Li Zhimin, et al. The relationship between detachment surface and seismicity in Xining basin [J]. *Earthquake*, 2008, 15(4): 290-297.
- [12] 田勤俭, 李智敏, 张军龙, 等. 西宁市活断层地震构造模型初步研究[J]. *地震地质*, 2007, 29(2): 311-319.
Tian Qinjian, Li Zhimin, Zhang Junlong, et al. A preliminary study on seismotectonic model for the active faults in Xining urban area [J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29 (2): 311-319 (in Chinese with English abstract).

- with English abstract).
- [13] 丁国瑜, 田勤俭, 孔凡臣, 等. 活断层分段原则、方法与应用[M]. 北京:地震出版社, 1993.
- Ding Guoyu, Tian Qinjian, Kong Fanchen, et al. The Principle of Active Fault Segmentation, Methods and Application [M]. Beijing: Seismological Press, 1993(in Chinese).
- [14] 涂德龙, 王赞军, 曾包红, 等. 青海省湟水盆地全新世活动断裂分布及其活动特征研究[J]. 西北地震学报, 1998, 20 (4):83-90.
- Tu Delong, Wang Zanjun, Zeng baohong, et al. Study on distribution and activity characters of the Holocene faults in the Huangshui Basin, Qinghai Province [J]. Northwestern Seismological Journal, 1998, 20 (4):83-90(in Chinese with English abstract).
- [15] 滕瑞增, 金瑶泉, 李西侯, 等. 西秦岭北缘断裂带新活动特征[J], 西北地震学报, 1994, 16(2):85-90.
- Teng Ruizeng, Jin Yaoquan, Li Xihou, et al. Recent activity characteristics of the fault zone at northern edge of western Qinling Mountain [J]. Northwestern Seismological Journal, 1994, 16(2):85-90(in Chinese with English abstract).
- [16] 王二七, 张旗. 青海拉脊山:一个多阶段抬升的构造窗[J]. 地质科学, 2000, 35(4):493-500.
- Wang Erqi, Zhang Qi. The Lajishan fault belt in Qinghai Province: A multi-staged uplifting structural window [J]. Chinese Journal of Geology, 2000, 35(4):493-500(in Chinese with English abstract).
- [17] 袁道阳, 石玉成, 刘百篪. 青藏高原东北缘地区晚第四纪水系沉积物年代标尺的初步研究[J]. 地震地质, 1999, 21 (1), 1-8.
- Yuan Daoyang, Shi Yucheng, Liu Baichi. Study on the time scale of late Quaternary hydrogenic sediments along the northeastern margin of Qinghai-Xizang plateau [J]. Seismology and Geology, 1999, 21 (1):1-8(in Chinese with English abstract).
- [18] 袁道阳, 张培震, 刘百篪, 等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报, 2004, 78(2):270-278.
- Yuan Daoyang, Zhang Peizhen, Liu Baichi, et al. Geometrical imagery and tectonic transformation of Late Quaternary active tectonics in northeastern margin of Qinghai-Xizang plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78 (2):270-278 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张军龙, 田勤俭, 李智敏, 等. 差分 GPS 方法在城市活断层探测中的应用探讨[J]. 地震, 2007, 27(3):74-81.
- Zhang Junlong, Tian Qinjian, Li Zhimin, et al. Use of differential GPS in detecting active faults in cities[J]. Earthquake, 2007, 27(3):74-81(in Chinese with English abstract).
- [20] 曾永年, 马海州, 李珍, 等. 西宁地区湟水阶地的形成与发育[J]. 地理科学, 1995, 15(3):254-258.
- Zeng Yongnian, Ma Haizhou, Li Zhen, et al. A study on terrace formation and development of the Huangshui river in Xining area [J]. Scientia Geographica Sinica, 1995, 15(3):254-258(in Chinese with English abstract).
- [21] Li Zhimin, Tian Qinjian, Yao Shenghai, et al. A preliminary study on the datong fault belt [J]. Earthquake Research in China, 2008, 22 (3):348-355.
- [22] Tian Qinjian, Li Zhimin, Zhang Junlong, et al. A preliminary study on seismotectonic model for the active faults in Xining urban area [J]. Earthquake Research in China, 2008, 22(1):15-23.

A discussion on the development model of the concealed fault along the Huangshui River in Xining

LI Zhi-min¹, ZHANG Jin², TIAN Qin-jian^{3,4}, ZHANG JUN-long⁴, TU Hong-wei¹

(1. Earthquake Administration of Qinghai Province, Xi'ning 810001, Qinghai, China; 2. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China; 3. China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China; 4. Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China)

Abstract: A few facts observed in recent years show that strong earthquakes occur not only in the exposed surface of active faults but also in some concealed structures. The deformation zone is not only an active fault in the mainland block but also a structural deformation zone with great width, as has been confirmed by a lot of seismic activity data. In order to correctly assess the risk of earthquakes, it is necessary to study the deformation of the stratigraphic model of the structure instead of studying only a single fault. The Huangshui River concealed fault is buried under the city of Xining, and the shallow seismic survey results show that the rupture fault is composed of two normal faults, and the area is across Xining City. Based on a study and analysis of the stratigraphic section, the authors hold that the broad anticline and syncline are composed of Neogene red mudstone, which was formed through deformation. The Huangshui River fault was developed in the core of the anticline, as shown by the relationship between the folds and faults. The Huangshui River concealed fault was formed under the main pressure in northeast direction, composed of two normal faults in the core of the anticline. The fault is on the slideway of Xining basin and belongs to a superficial fault, whose activity is not significant.

Key words: Huangshui River concealed fault; fold deformation; fault development model; Xining

About the first author: LI Zhi-min, male, born in 1977, assistant researcher, engages in the study of active tectonics and engineering seismic; E-mail: minhero_168@126.com.