

兰州黄河阶地高精度 GPS 测量与构造变形研究

刘兴旺^{1,2}, 袁道阳^{1,2}, 葛伟鹏^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000)

摘要:在综合分析兰州黄河阶地发育和分布特征的基础上,采用高精度差分 GPS 测量并结合 1:1 万 DEM 图形数据资料,获得了黄河兰州段南北两岸阶地平面分布图和纵横剖面对比图。结合本区黄河不同级别阶地年代测试结果,研究了其构造变形特征,获得了穿越断裂带地区的阶地变形特点、变形带宽度、变形幅度和速率等定量参数。结果表明:兰州盆地晚第四纪的构造变形主要以褶皱隆升为主,盆地内的断裂晚第四纪无明显构造活动。

关键词: 兰州; 黄河; 阶地; 构造变形; 高精度 GPS 测量

中图分类号: P931.2; P546

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2007)04-0341-06

Study on Tectonic Deformation of the Yellow River Terraces in Lanzhou Based on the High-resolution GPS Surveying

LIU Xing-wang^{1,2}, YUAN Dao-yang^{1,2}, GE Wei-peng^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of seismology, CEA, Lanzhou, 730000, China;

2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: Based on analyzing the development and distribution of Yellow River terraces in Lanzhou city, using the high-resolution differential GPS measuring and DEM (1:10 000) mapping data, the terrace map and profiles along and cross the river are gotten. Complaining with the dating results of the different grade terraces, the tectonic deformation characters of the terraces are studied, and the quantitative parameters of terrace deformation characters, the widths of deformation zones, the extents and velocities of deformation in active fault zone are obtained. In conclusion, it is indicated that folding effect plays major role in tectonic deformation of Lanzhou Basin in late-Quaternary, while tectonic activity of faults has been not clear since that time.

Key words: Lanzhou; Yellow River; Fluvial terrace; Tectonic deformation; High-resolution GPS measuring

0 引言

兰州市地处新构造活动强烈的青藏块体东北部边缘,黄河穿市区而过。沿兰州黄河两岸发育了完整而典型的多级河流阶地,其上堆积了厚度不等的黄土。兰州黄河阶地及黄土堆积所代表的第四纪地貌、沉积及构造涵义一直受到中外地质学者的广泛关注,多年来围绕兰州黄河阶地地貌发育与年代学

研究取得了一系列重要研究成果,尤其是建立了以黄土磁性地层年代学研究为基础的黄河阶地年代序列^[1-2]。但上述研究工作的重点是黄河高阶地磁性地层年代,探讨的重点是地貌发育与气候、构造隆升之间的关系。而活动构造研究中关注的重点时段是晚第四纪,因此我们重点选取了黄河 T₀—T₃ 级低

收稿日期:2007-06-18

基金项目:中国地震局“十五”重点项目(1-4-28-1)《兰州市活断层探测与地震危险性评价》资助;中国地震局兰州地震研究所论著号:LC20070053

作者简介:刘兴旺(1980—),男(汉族),山东东营人,硕士,主要从事活动构造与地貌年代学研究工作。

阶地开展了包括地层剖面岩性、古气候及地层年代学等的系统研究^①,为探讨兰州黄河阶地变形特征奠定了基础。在构造变形研究方面,刘小凤等^[3]曾用气压计对兰州黄河两岸阶地砾石层进行过测量,获得了本区阶地纵剖面图。但气压计误差较大,存在一定的不确定性。潘保田等^[4]选择构造相对简单的兰州东盆地北岸进行了差分GPS测量和构造变形研究。鉴于准确地确定阶地高度及其沿纵横剖面变化特征在兰州盆地活动构造研究中的重要性,在前人大量的年代学和构造地貌研究基础上,我们采用高精度差分GPS测量来提高研究精度,并跨整个兰州盆地进行系统测量,以期获得整个兰州盆地阶地发育和构造变形特征。

1 兰州黄河阶地发育和分布特征

根据刘小凤等^[3]的研究结果,在兰州河口—桑园峡段黄河两岸共发育了七级阶地,局部阶地数达到九级^[4]。我们在前人阶地划分的基础上,对1:1万航空照片做了详细解译,根据地貌形态和高差等特征勾绘出不同阶地面分布图,并到野外进行实地观测和校核;同时结合数字高程模型和1:1万地形图等资料,得到了较为完整的兰州黄河阶地分布图(图1)。总体上看兰州黄河两岸各级阶地的分布状况不尽相同,这不仅与河流的下切和侧蚀作用的差异有关,而且与所处的构造部位也有密切联系。其中黄河北岸阶地发育完整但分布局限,阶地台面狭小,Ⅳ级以上阶地受后期流水冲刷形成丘陵状地貌,表明黄河北岸侧蚀作用较强;黄河南岸广泛发育Ⅰ—Ⅲ级阶地,形成宽阔平整的阶地台面,其中Ⅲ级阶地最为发育,表明黄河南岸堆积作用较强。在构造隆起或断裂通过部位,河流下切作用强烈,阶地级数相对较多,但阶地面狭窄;而其它地段阶地相对较宽,阶地面平坦。

兰州阶地以基座阶地为主,基座主要为第三系红色砂砾岩、砂岩或白垩系砂岩与泥岩的互层,上覆3~5 m厚的阶地砾石层,其上为冲积黄土和风成黄土,黄土厚度随着阶地级数的增加而变厚。

2 兰州黄河阶地特征及年代序列

根据前人的研究结果及本次研究工作,黄河兰州段发育了包括河漫滩在内的10级台地(T_0 — T_9),其地质地貌特征和年代研究结果如下。

由于河流流向的变化,沿兰州黄河两岸发育了

一系列串珠状滩地,如大滩、马滩、迎门滩和雁滩等,拔河高度1~3 m,根据王萍等^②对大滩 T_0 的研究结果,其光释光(OSL)年代为 4.1 ± 0.4 ka,为全新世中晚期。

Ⅰ级阶地分布广泛,是目前主要市区所在地,阶地面海拔高度为1510~1550 m,主要为基座阶地。阶地下部砾石层拔河5~10 m,上覆薄层冲积砂,顶部为全新世黄土。根据王萍等^②对孔家崖 T_1 的研究结果,其光释光(OSL)年代为8~10 ka,为全新世早期。

Ⅱ级阶地分布局限,主要发育在安宁区沙井驿及罗锅沟口到砂金坪等地,阶地面海拔高度1560~1570 m。安宁区以基座阶地为主,基座为第三系红层;石峡口—砂金坪为侵蚀阶地,底部砾石层厚5 m左右,上覆10~15 m的冲积黄土层,顶部为20 m厚的风成黄土,冲积黄土底部 ^{14}C 年龄为 34.8 ± 1.26 ka. B. P.。在最新的研究中该级阶地被定为60 ka^[5]。

Ⅲ级阶地主要分布在河口、西固和白塔山等处,是区内发育最完善,分布最广泛的一级阶地。在柳沟坪至深沟桥段存在高差不超过50 m的两级台地,称为Ⅲ1和Ⅲ2两级亚阶地。Ⅲ1级阶地面海拔高度1595~1610 m,为基座阶地,砾石层顶面海拔高度1570 m,上覆冲积砂土,层理清晰,顶部为风成黄土,大约形成于130 ka. B. P.^[5]。Ⅲ2级阶地面海拔高度为1660~1680 m,为基座阶地。砾石层厚度为3~5 m,上覆10 m左右的冲积黄土,顶部为10 m以上的风成黄土,底部含有2~3 m古土壤。最高层古土壤(S_2)的形成年龄大约为225 ka. B. P.,可定为中更新世晚期。

Ⅳ级阶地主要分布在黄河北岸,以五一山最为典型。阶地面海拔高度1760 m,基座为晚第三纪红层,高出河面140~150 m,基座之上砾石层厚约5~10 m,上覆10~15 m厚的冲积黄土,顶部为100 m厚的风成黄土。根据砾石层顶部冲积黄土底部 S_0 古土壤层及古地磁测年结果,确定Ⅳ级阶地约形成于860 ka. B. P.以前,定为早更新世晚期。

潘保田等^[4]在兰州东盆地小砂沟、大浪沟发现两级新的阶地,高度位于Ⅳ级阶地之上,定为Ⅴ、Ⅵ

① 甘肃省地震局. 兰州市活断层探测与地震危险性评价. 初勘报告, 2006.

② 中国地震局地质研究所. 兰州盆地河谷区低阶地(T_3 及以下)标准地层剖面的建立. 2006.

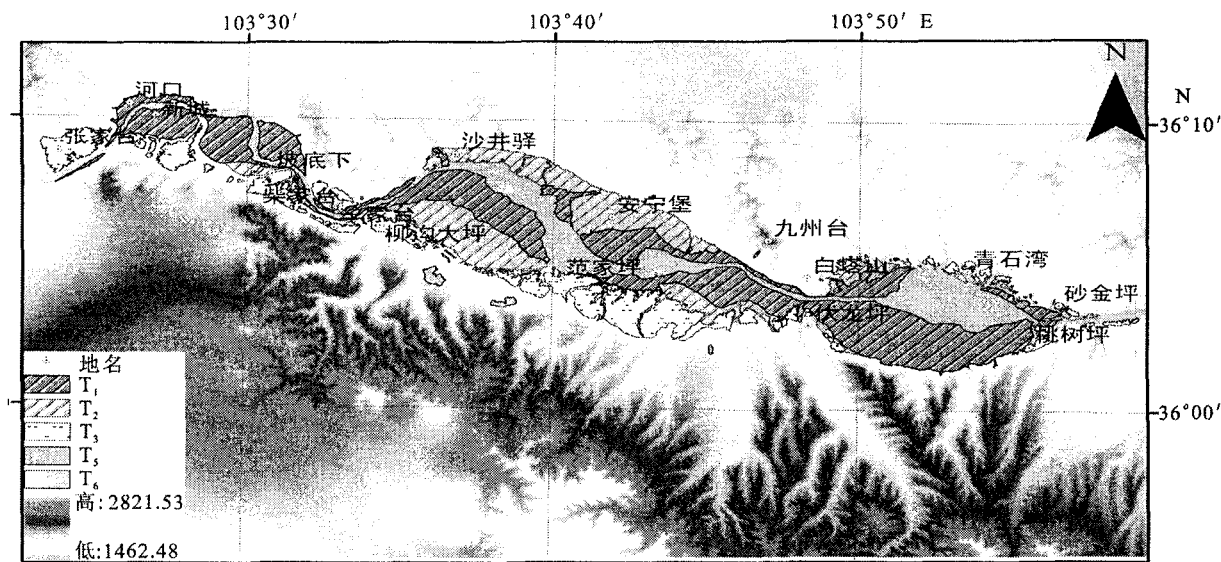


图1 根据 1:1 万航片和数字高程模型得到的兰州黄河阶地分布图

Fig.1 Map of distribution of Yellow River terraces based on air-photo (1:10,000) and DEM.

级阶地。根据黄土古土壤年代对比, V 级阶地的形成年代约为 960 ka, VI 级阶地的形成年代为 1 050 ka, 皆为早更新世晚期。

VII 级阶地分布在黄河北岸(即原 V 级阶地), 以墩洼山最为典型。属基座阶地, 拔河 200~250 m, 底部砾石层 3~10 m 厚, 上覆 20 m 左右的冲积黄土, 顶部为厚层风成黄土。根据冲积黄土底部出现的古土壤层 S_{14} 和风成黄土层底部出现的古土壤层 S_{13} , 结合古地磁测年结果确定 V 级阶地的形成时代为 1 240 ka B. P., 属早更新世晚期。

VIII 级阶地以九州台为代表(即原 VI 级阶地)。阶地面高程 2 060 m, 基座为皋兰群变质岩及第三纪红层, 高出现代黄河 230 m, 基座之上为 2~3 m 厚的河床相砾岩层, 上覆 21 m 厚的冲积黄土, 顶部为 300 m 的风成黄土。风成黄土底部为古土壤层 S_{18} , 古地磁测年结果表明风成黄土下界为 1.3 Ma, 而河床相冲积层的裂变径迹年龄为 1.4 ± 0.1 Ma^[6], 由此推断 VI 级阶地大约形成于 1 400 ka, 属早更新世早期。

IX 级阶地主要分布在九州台以北的薛家湾、烟洞沟一带(即原 VII 级阶地)。基座高出黄河河面 330 m 左右, 砾石层厚 10 m, 其上为 20 m 厚的具有水平层理的粉砂层, 最上部为厚达 110 m 的风成黄土。该级阶地形成于 1.6 Ma B. P. 前后^[6]。

3 黄河阶地差分 GPS 测量的标志层及误差分析

根据河流地貌发育过程, 阶地面应是指低一级阶地下切之前本级阶地刚露出洪水水位时形成的阶地砾石层顶面。其上堆积的细粒砂土等因沉积环境变化而厚度存在差异, 因此阶地变形测量应以同级阶地砾石层顶面高度作为对比标准。但由于兰州黄河阶地砾石层大部分上被广泛发育的风成黄土埋藏了, 出露点零星且分布不均匀, 而且高级阶地后期受流水冲刷成丘陵状地貌, 地形陡峭, 不利于现场测量, 因此很难依靠零星出露的阶地砾石层顶面高度进行测量对比。

假设同一级阶地形成以来, 在相同的区域气候和构造条件下其上覆黄土层厚度是大致相等的, 那么就可以用同级阶地台面的高度代替砾石层面的高度来分析阶地变形特征。为此我们选取了兰州阶地发育广泛而典型的 III 级阶地的顶面高度和砾石层高度进行对比和相关分析(图 2)。

二者高度相关性分析的结果: T_{3-1} 的相关系数为 0.972, T_{3-2} 的相关系数为 0.966, 看出阶地面高度与砾石层高度存在着显著的线性关系, 我们认为可用阶地面高度来分析其变形特征, 以弥补阶地砾石层被覆盖的不足。因此我们以黄河阶地砾石层差分 GPS 测量为基础, 结合阶地顶面的 1:1 万 DEM 图形数据, 来分析黄河所穿过构造带地区的阶地变形特征。

4 黄河阶地构造变形特征

研究中选择兰州盆地内阶地发育较广泛、阶地面完整、砾石层出露较好的 II—IV 级阶地, 特别是 III

级阶地进行构造变形的定量研究。测量采用瑞士莱卡 1200 系列差分 GPS 仪,共实测了 1700 多个砾石层高度值(图 3),做出河流阶地纵、横剖面图。同时

利用 DEM 数据的地表高度,做出河流阶地地面的纵、横剖面,二者相互印证、相互比较和相互补充,而后分析整个兰州盆地河流阶地的变形特征。

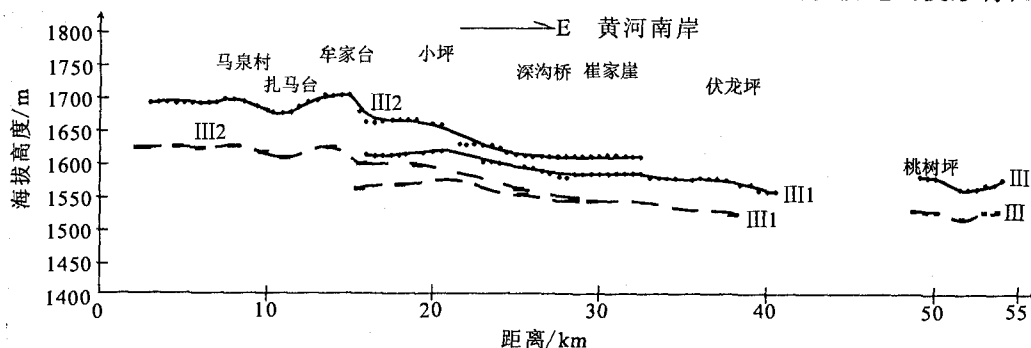
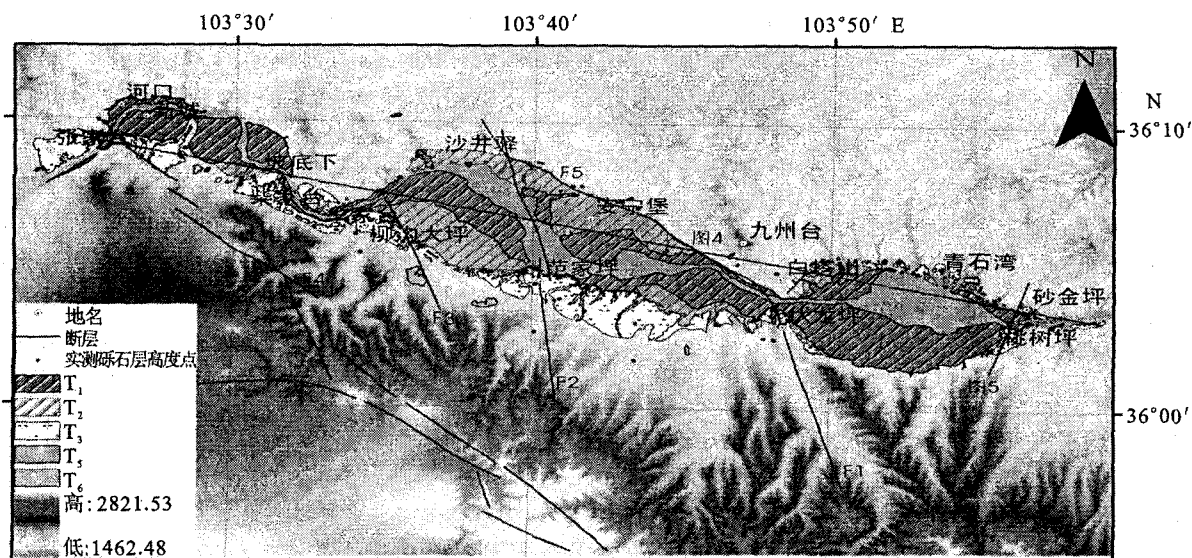


图 2 黄河南岸Ⅲ级阶地面与砾石层高度对比图(实线代表的是根据 DEM 所得的阶地面高度变化,虚线代表根据差分 GPS 所测得的砾石层高度变化)

Fig. 2 Comparison between terrace surface and gravel layer on the terrace III in south bank of Yellow River.



F₁: 雷坛河断裂; F₂: 原深沟桥断裂; F₃: 寺儿沟断裂; F₄: 马街山北缘断裂; F₅: 金城关断裂

图 3 利用差分 GPS 实测兰州黄河阶地砾石层高度点分布图

Fig. 3 Distribution of the surveying points for differential GPS on the Yellow River terraces in Lanzhou.

4.1 兰州黄河阶地纵剖面变形特征

将阶地分布图展布于 1:1 万 DEM 图像上,大致沿河流方向画一条直线,分别将南北两岸各级阶地高度投到直线上,再将同级阶地连起来做成阶地顶面纵剖面图。同时将所测得砾石层高度投到直线上,做出砾石层高度的纵剖面图(图 4)。

分析纵剖面图可以得到以下几点认识:

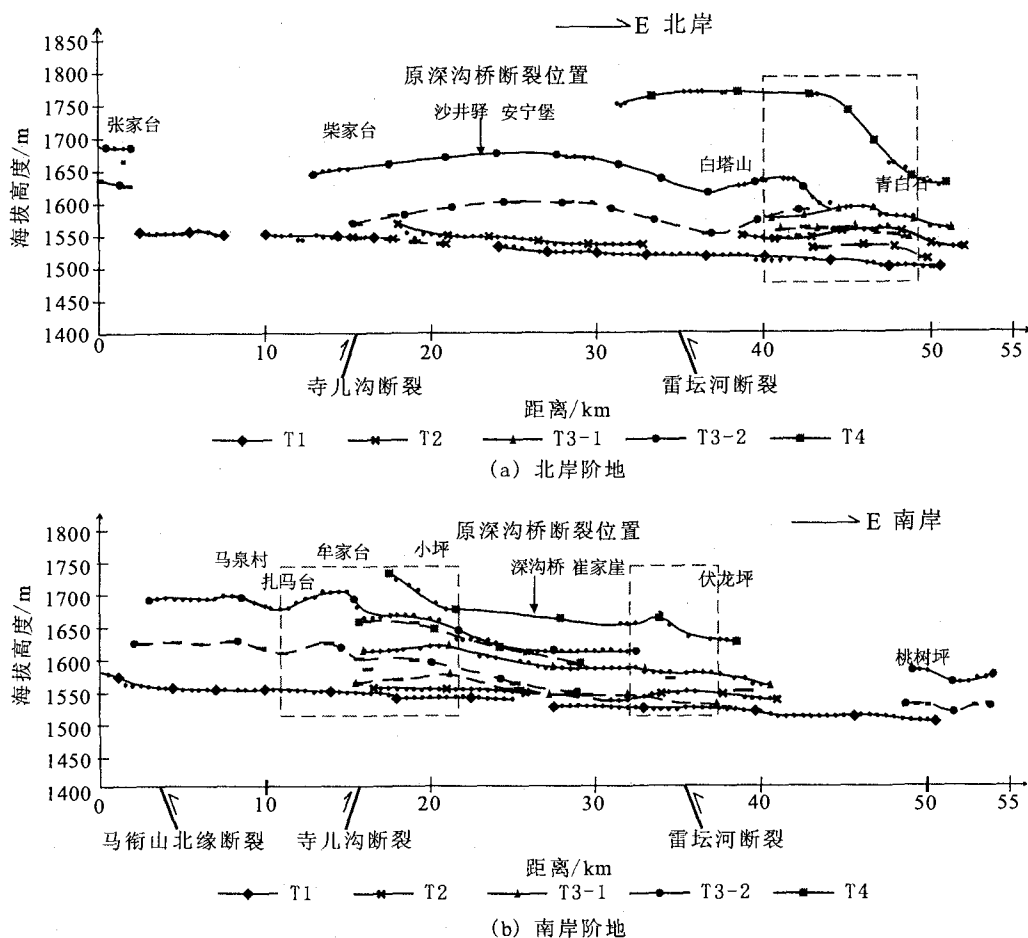
(1) 在黄河北岸 I 级阶地面基本平稳而连续,无明显构造变形反映。II 级阶地似有小幅变形,尤以白塔山附近最为明显,幅度约 20 m(指与正常段之间的高度差,下同)。由于低阶地主要为兰州市区所在地,受后期人为改造较多,测量精度差一些,其

可靠性也差一些。Ⅲ级以上阶地在白塔山—九州台一带呈现出明显的变形反映,其抬升幅度随阶地级序的增加而变大,形成以白塔山为中心宽约 9~10 km 的变形带,构成白塔山—九州台背斜褶皱隆起区。其中Ⅲ1 级阶地变形幅度达 30 m;Ⅲ2 级阶地变形幅度达 45 m;Ⅳ级阶地变形幅度达 120 m 左右。根据相应的阶地年代计算,其变形速率分别为: 0.23 mm/a、0.2 mm/a 和 0.14 mm/a(表 1)。

(2) 黄河南岸 I 级阶地平稳而连续,构造变形不明显。II 级阶地略有变形,在西端牟家台附近达 10 m 左右。Ⅲ级以上阶地在西端形成以牟家台为中心宽约 9~12 km 的变形带,构成牟家台—柴家

台背斜褶皱隆起带,其中Ⅲ1级阶地变形幅度达18 m;Ⅲ2级阶地变形幅度达35 m;Ⅳ级阶地变形幅度达70 m左右,根据相应的阶地年代计算得到其变形速率分别为:0.14 mm/a、0.16 mm/a和0.08 mm/a。在东端的伏龙坪附近Ⅱ级以上阶地也有变

形反映,但幅度较小,变形宽度约3 km,其中Ⅱ级阶地变形幅度达15 m,Ⅳ级阶地变形幅度达27 m左右,其变形速率分别为:0.25 mm/a和0.03 mm/a(表1)。



(虚线为实测阶地砾石层顶面;实线为根据实测结果校对后得到的阶地顶面;方框内为阶地变形带)

图4 兰州黄河阶地纵剖面图

Fig. 4 Longitudinal profiles of Yellow River terraces in Lanzhou.

表1 黄河阶地变形统计表

阶地 级数	年代 /ka	南岸(牟家台)		南岸(伏龙坪)		北岸(白塔山—九州台)	
		变形幅度/m	变形速率/mm·a ⁻¹	变形幅度/m	变形速率/mm·a ⁻¹	变形幅度/m	变形速率/mm·a ⁻¹
Ⅱ	60	10—12.5	0.17—0.21	15	0.25	20	0.33
Ⅲ1	130	18	0.14			30	0.23
Ⅲ2	225	35	0.16			45	0.20
Ⅳ	860	70	0.08	27	0.03	120	0.14

(3) 从图4可见,兰州盆地存在2个明显的阶地变形隆起区,分别对应地质上所称的分隔兰州东西盆地边界的柴家台—牟家台隆起(西边界)和皋兰山—白塔山、九州台隆起(东边界),其位置分别与地质上的寺儿沟断层和雷坛河断层的存在相吻合。根据兰州活动断层探测结果^①,上述两断裂主要为第四纪早期活动断裂,晚第四纪以来新活动性不明显,

阶地纵剖面也反映了这一特点。

(4) 在前人提出的原深沟桥断裂带附近无明显变形反映,这与本次研究证明该断裂仅为岩性界线而不是断层的结论相一致^②。在马街山断裂的西端,其上覆的Ⅲ级阶地没有发生变形,说明马街山断裂晚第四纪的构造活动终止于黄河以东,未过黄河。

(5) 对比分析黄河南北两岸阶地变形幅度和速

率(表1)可知,黄河南岸变形范围宽,形成以牟家台和伏龙坪为中心的两个褶皱隆起带,西(牟家台)强东(伏龙坪)弱,在二者之间构成一向斜形凹陷,而黄河北岸变形带主要集中在东端的白塔山—九州台一带。

(6) 阶地变形最常见的有两种类型,即穿过构造抬升区引起的拱曲和横切活动断裂引起的断错。兰州盆地黄河阶地变形主要拱曲为主而不是直接断错,形成一较宽的构造变形带,说明其构造活动以褶皱隆起为主。盆地内发育的寺儿沟断层和雷坛河断层等主要为褶皱过程中形成的伴生断裂。

4.2 兰州黄河阶地横剖面变形特征

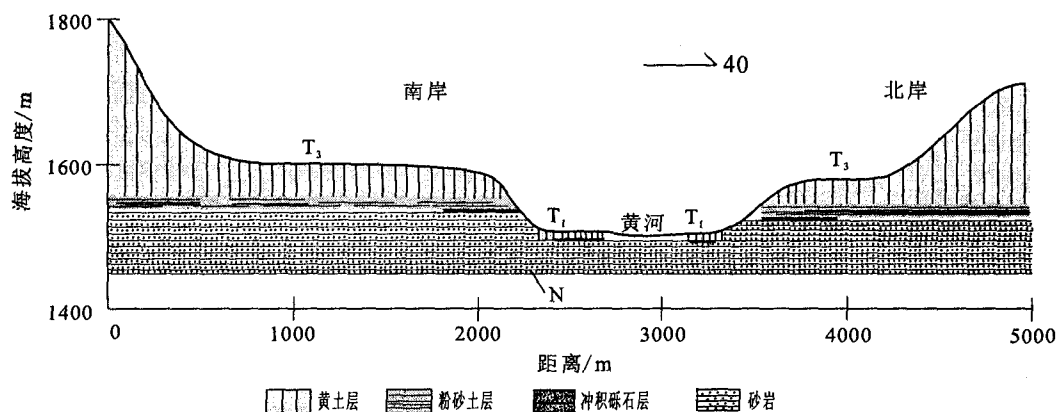


图5 桃树坪阶地横剖面图

Fig. 5 Vertical profiles of terrace in Taoshuping.

5 结论

通过对兰州黄河阶地高分辨率航片解译和阶地砾石层高度的差分GPS测量,结合1:1万DEM图像数据,获得黄河南北两岸阶地纵横剖面图,参考该区断裂的活动特征,综合研究得到如下认识:

(1) 兰州黄河阶地表层黄土分布稳定,阶地顶面高度可用来代替砾石层顶面反映构造变形。

(2) 沿兰州黄河南北两岸I级阶地基本连续平整,无明显构造变形反映;II级略有变形,但其可靠性差;III级以上阶地均有不同幅度的变形反映,变形幅度随阶地级数增加而增加。计算得到其变形速率平均为0.2 mm/a左右。

(3) 在黄河北岸形成白塔山构造变形带;南岸形成牟家台和伏龙坪两个褶皱隆起带,与分隔兰州东西盆地边界的柴家台—牟家台隆起(西边界)和皋兰山—白塔山、九州台隆起(东边界)相对应。并分

别与地质上的寺儿沟断层和雷坛河断层的存在相吻合。根据兰州活动断层探测结果,上述两断裂主要为第四纪早期活动断裂,晚第四纪以来新活动性不明显,阶地纵剖面也反映了这一特点。

黄河阶地横剖面主要是通过DEM图形数据和野外实地调查得到的。我们在大致垂直河流的方向上以1000 m为间隔,在重要地方适当加密,共做了50条横剖面。综合分析黄河阶地横剖面显示(图5):黄河南岸同级阶地拔河高度大多比黄河北岸高,反映盆地南高北低的特点,说明黄河南岸的堆积作用强于北岸,北岸侵蚀或侧蚀作用比南岸强;同时也可能说明兰州盆地构造变形的力源主要来自西南侧,并逐渐向东北方向传递,致使南岸抬升幅度大于北岸,这是马衔山断裂逆走滑过程中在盆地内部形成挤压褶皱构造区的地貌反映。

别与地质上的寺儿沟断层和雷坛河断层的存在相吻合。根据兰州活动断层探测结果,上述两断裂主要为第四纪早期活动断裂,晚第四纪以来新活动性不明显,阶地纵剖面也反映了这一特点。

(4) 阶地变形最常见的有两种类型,即穿过构造抬升区引起的拱曲和横切活动断裂引起的断错。兰州盆地黄河阶地变形主要拱曲为主而不是直接断错,盆地内发育的寺儿沟断层和雷坛河断层等主要为褶皱过程中形成的伴生断裂^[7]。

(5) 黄河阶地横剖面显示南岸同级阶地拔河高度大多比黄河北岸高,反映盆地南高北低的特点,同时也可能说明兰州盆地构造变形的力源主要来自西南侧,致使南岸抬升幅度大于北岸,这是马衔山北缘断裂逆走滑过程中在盆地内部形成挤压褶皱构造区的地貌反映^[7-8]。

(2) 讨论了影响既有建筑结构抗震能力的因素,并应用到抗震评估体系中去。

(3) 通过具体的工程实例,表明该评估方法可定量评估既有含剪力墙钢筋混凝土结构的抗震能力,了解各楼层的抗震性能。

[参考文献]

- [1] 杨仕升,郝效强,秦荣. 钢筋混凝土框架结构抗震能力评估研究[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(5):80-84.
- [2] 杨仕升. 钢筋混凝土结构抗震能力评估研究[D]. 南宁:广西大学,2006.
- [3] 郝效强. 钢筋混凝土框架-剪力墙结构抗震能力评估[D]. 南宁:广西大学,2006.
- [4] 范家骥,高莲娣,喻永言,编著. 钢筋混凝土结构(下册)[M]. 北

京:中国建筑工业出版社,1991:218-243.

- [5] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范(GB50010—2002)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:42-44.
- [6] 蓝宗建,梁书亭,孟少平,编著. 混凝土结构设计原理[M]. 南京:东南大学出版社,2002:431.
- [7] 中华人民共和国建设部. 建筑抗震设计规范(GB50011—2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [8] 孙彬,牛荻涛,董振平. 在役结构抗震评估地震作用取值研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2003,35(4):312-316.
- [9] 中国地震局工程力学研究所,中国建筑科学研究院工程抗震研究所,哈尔滨工业大学. 建筑工程抗震性态设计通则(试用)(中国工程建设标准化协会标准—CECS160:2004). 北京:中国计划出版社,2004:132-214.

(上接 346 页)

[参考文献]

- [1] 朱俊杰,曹继秀,钟巍,等. 兰州地区黄河最高级阶地与最老黄土沉积的发现及其古地磁年代学的研究[A]//青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究[G]. 北京:科学出版社,1994:77-90.
- [2] 陈发虎,李吉均,张维信. 兰州黄土地层研究[A]//中国西部第四纪冰川与环境[G]. 北京:科学出版社,1991:120-129.
- [3] 刘小凤,袁道阳,刘百簋. 兰州及邻近地区河流阶地变形特征[J]. 西北地震学报,2003,25(2):119-125.
- [4] 潘保田,苏怀,刘小丰,等. 兰州东盆地最近 1.2Ma 的黄河阶地

序列与形成原因[J]. 第四纪研究,2007,27(2):172-180.

- [5] 陈发虎,张宇田. 兰州九洲台黄土沉积年代综合研究[J]. 沉积学报,1989,7(3):105-111.
- [6] 李吉均,方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究[J]. 科学通报,1998,43(15):1569-1574.
- [7] 袁道阳,刘小凤,郑文俊,等. 兰州马衔山—兴隆山活动断裂系的新构造变形特征和机制[J]. 中国地震,2003,19(2):125-131.
- [8] 袁道阳,刘百簋,才树华,等. 兰州马衔山北缘断裂带的新活动特征研究[J]. 地震地质,2002,24(3):315-323.