

# 天山北麓河流阶地序列及形成年代

吕红华<sup>1</sup>, 李有利<sup>1</sup>, 南峰<sup>2</sup>, 司苏沛<sup>1</sup>, 刘运明<sup>1</sup>, 钱麟<sup>1</sup>, 赵洪壮<sup>1</sup>

(1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;

2. 高等教育出版社, 北京 100029)

**摘要:** 天山北麓河流阶地序列及其年代一直是悬而未决的问题。根据详细的野外工作, 确定天山北麓发育 7 级河流阶地, 其中 T<sub>7</sub>、T<sub>6</sub>、T<sub>5</sub> 及 T<sub>2</sub> 等主要阶地为河流切割先期冲积扇而形成, 与 4 级阶地对应的 4 期冲积扇分别为 F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub> 与 F<sub>4</sub>。由于天山北麓构造隆升向盆地方向迁移, 冲积扇呈串珠状发育, 背斜带间发育的冲积扇平面形态则由于南北背斜的限制而变得不规则。基于黄土—古土壤序列对比分析、ESR 与 OSL 测年以及前人研究成果, 确定天山北麓河流下切形成 T<sub>7</sub>、T<sub>6</sub>、T<sub>5</sub> 及 T<sub>2</sub> 等阶地的时间分别为约 0.54 Ma BP、0.3~0.2 Ma BP、28~8 ka BP 和全新世早期。阶地年代表明, 天山北麓 3 级主要阶地 T<sub>7</sub>、T<sub>6</sub>、T<sub>5</sub> 及对应冲积扇发育与天山更新世 3 个冰期间冰期旋回基本对应。

**关键词:** 河流阶地; 冲积扇; ESR; 黄土—古土壤地层序列; 天山

## 1 引言

构造相关沉积<sup>[1-7]</sup>与层状地貌(夷平面、剥蚀面、阶地等)<sup>[8-13]</sup>作为记录山体隆升历史的重要地质载体, 一直是构造地貌研究的最重要的内容与对象之一, 而对于最近地质时期的构造运动研究, 河流阶地由于含有丰富的构造运动与气候变化信息而具有十分重要的意义<sup>[9, 10, 12, 14-22]</sup>。因此, 阶地序列及阶地的构造变形等一系列问题一直是新构造和古气候研究的重要内容, 而阶地年代则是其分析的基础与前提。尽管最近一、二十年来由于测年技术的发展<sup>[22-29]</sup>, 河流阶地研究取得了很大进展<sup>[9, 10, 12, 14-22]</sup>, 但在具体研究过程中, 常常由于缺乏适合测年的材料以及测年技术手段的限制等因素而难以取得可靠的年代数据, 以致限制了对阶地相关资料的深入分析。

天山具有十分复杂的演化历史<sup>[30]</sup>, 自新生代以来, 由于受到印度—欧亚板块碰撞作用, 天山北麓逐渐形成现今地貌与构造格局<sup>[30-34]</sup>, 而河流阶地发育与变形则明显受天山北麓特有构造地貌格局的影响。目前对于天山北麓河流阶地的研究多集中在阶地的发育特征和变形上<sup>[35-37, 39-41]</sup>, 现有的关于阶地年代的报道存在很大分歧<sup>[14, 38-41]</sup>。根据方小敏等<sup>[38]</sup>对天山北麓清水河 T<sub>6</sub> 阶地(与本文阶地划分一致, 对应于其他文献中的 III 级阶地)上覆黄土进行的磁性地层研究结论推断, T<sub>6</sub> 阶地形成时间将不晚于 0.8 Ma BP; 王永等<sup>[39]</sup>根据热释光年龄和沉积速率得出安集海河高阶地的形成年龄为约 0.14~0.12 Ma BP; 文献[40]给出的塔西河 III 级阶地即 T<sub>6</sub> 的形成时间更晚, 为 0.03 Ma BP; 张培震等<sup>[41]</sup>则根据北天山冰期、冰水冲洪积扇与阶地的对应关系, 推断天山北麓河流 III 级阶地形成于约 0.12~0.06 Ma BP。基于此, 本文通过详细的野外工作, 试图弄清天山北麓主要河流的阶地序列, 进而依据黄土—古土壤序列分析和 ESR 与 OSL 测年, 以提出关于天山北麓河流阶地序列及发育年代的新看法。

收稿日期: 2007-05-15; 修订日期: 2007-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571013) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40571013]

作者简介: 吕红华(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事构造地貌、环境演变及沉积地质等研究。

E-mail: lvhh2008@163.com

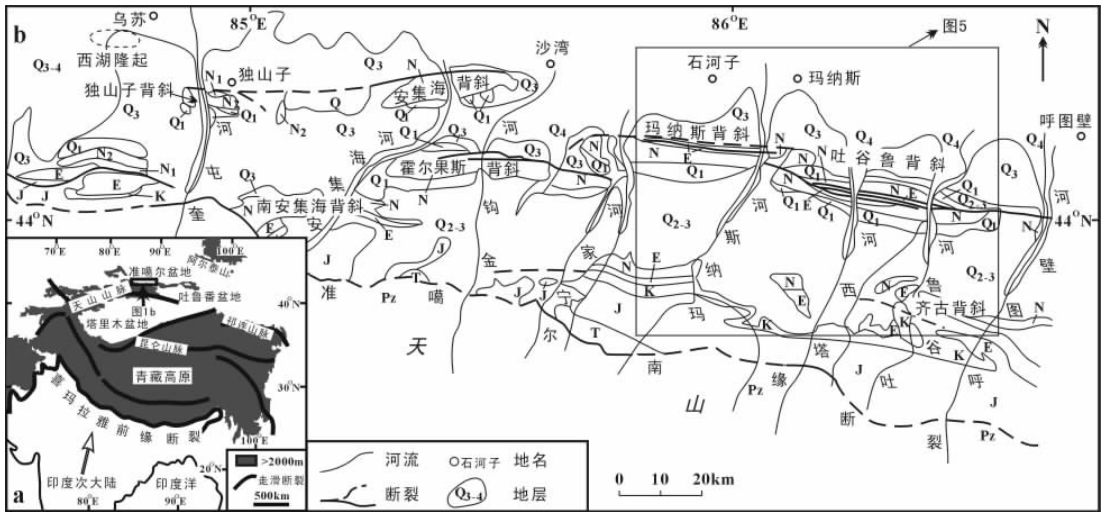


图 1 天山北麓地质构造简图 (根据文献[43, 44]改编)

Fig. 1 Geological map along the northern piedmont of the Tianshan Mountains (modified from references [43, 44])

### 2 区域地质背景

天山山体夹持于南部的塔里木盆地与北部的准噶尔盆地之间，形成巨大的地势落差。新生代以来，由于受到印度—欧亚板块碰撞挤压作用的影响 (图 1a)，天山地区明显受南北向应力挤压而发生地壳缩短<sup>[31]</sup>，山体再次隆起，两侧盆地进一步拗陷。在天山北麓山前拗陷内强烈变形的挤压构造带形成了山前逆冲席体，在地表表现为一系列近东西向延伸的受逆断裂控制的背斜带<sup>[31, 34, 43]</sup>，由南向北分别为第 I 排山麓背斜带 (包括齐古背斜和南安集海背斜等)、第 II 排吐谷鲁—玛纳斯—霍尔果斯背斜带以及第 III 排安集海—哈拉安德—独山子背斜带 (图 1b)。研究表明，这三排背斜带形成时间从南向北由老到新<sup>[34, 42]</sup>，即第 I 排山麓背斜带主要形成于晚中新世—上新世时期；第 II 排背斜带构造变形的起始时间约在上新世末—早更新世初；第 III 排背斜带形成于早更新世末—中更新世初。被卷入背斜的新生代地层在背斜的南北两翼成近似对称分布 (图 1b)。此外，在第 III 排背斜带西北的乌苏附近发育了一个形成时代更新、隆起幅度更小的西湖隆起，是一个正在活动的活动背斜。一系列南北流向的河流横切这三排背斜带 (图 1b)，河流在新构造运动的作用下迁移改道，发育的河流阶地则受背斜带构造活动的影响而发生变形和变位。因此关于阶地的发育特征及变形研究对揭示天山北麓晚新生代的构造活动有重要意义，而阶地发育年代则是分析的基础。

### 3 河流阶地序列

尽管前人对于天山北麓的河流阶地做了一定研究<sup>[14, 34, 37, 40, 41]</sup>，并认为山前河流主要发育 3 级连续阶地，但 3 级阶地的划分方案并没有充分考虑存在于局部的阶地，从而不能很好地反映背斜段河流阶地的发育情况。为查清天山北麓河流阶地序列，笔者对塔西河、玛纳斯河、三个泉河以及金钩河等主要河流的阶地进行了野外测量和相关研究，内容包括阶地砾石层的沉积特征、阶地面的延展度 (纵向延续性和横向宽度) 以及阶地拔高高度等，并完成了阶地年代样品、典型黄土剖面粒度与磁化率样品的采集。

经全面考察，认为天山北麓河流发育 7 级阶地 (表 1)，其中 T<sub>7</sub> 阶地发现于玛纳斯河

表 1 天山北麓河流典型阶地横剖面

Tab. 1 Typical cross-section of fluvial terraces along the northern piedmont of the Tianshan Mountains

阶地横剖面位置	阶地编号	阶地类型	阶地拔河高度/m	备注
玛纳斯河红山嘴剖面 (图 2a)	T <sub>7</sub>	覆盖基座	153	基座为上新统褐色泥岩。此处阶地序列完整, 相对于背斜南北两侧, 增加了受背斜构造活动影响而发育的 T <sub>4</sub> 和 T <sub>3</sub> 两级阶地。
	T <sub>6</sub>	基座	105	
	T <sub>5</sub>	基座	84	
	T <sub>4</sub>	基座	59	
	T <sub>3</sub>	基座	41	
	T <sub>2</sub>	基座	29	
	T <sub>1</sub>	基座	16	
塔西河十间房南剖面 (图 2c)	T <sub>6</sub>	基座	93	基座为上新统红色泥岩。该剖面阶地序列较完整, 阶地级数的增加同样缘于背斜构造活动, 但 T <sub>7</sub> 阶地不发育。
	T <sub>5</sub>	覆盖基座	49	
	T <sub>4</sub> <sup>h</sup>	覆盖基座	42	
	T <sub>4</sub> <sup>l</sup>	覆盖基座	39	
	T <sub>3</sub>	覆盖基座	32	
	T <sub>2</sub>	基座	16	
	T <sub>1</sub>	基座	3	
金钩河泥火山南剖面 (图 2b)	T <sub>5</sub>	基座	65	基座为渐-中新统红色泥岩、砂质泥岩。在东岸 T <sub>6</sub> 阶地仅残存于零星的孤峰之上。
	T <sub>4</sub>	基座	61	
	T <sub>2</sub>	基座	44	

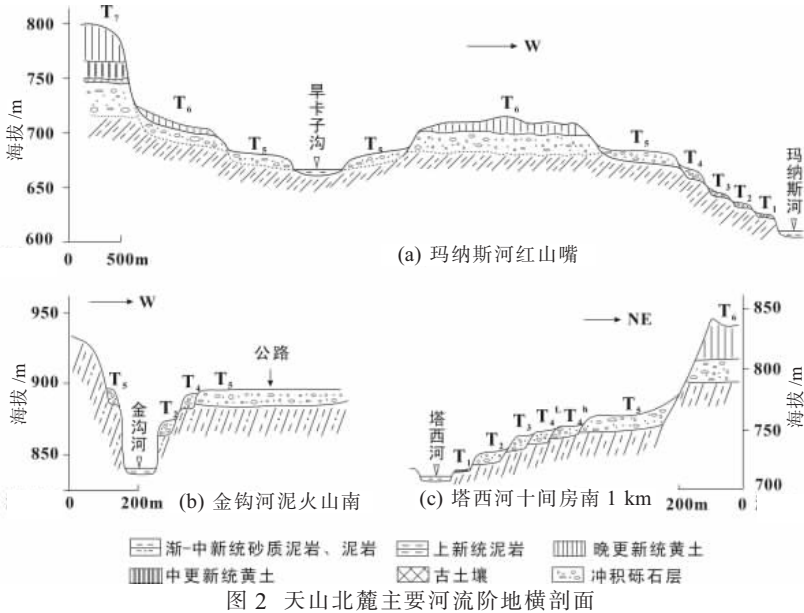


图 2 天山北麓主要河流阶地横剖面

Fig. 2 Terrace cross sections of main rivers along the northern piedmont of the Tianshan Mountains

流域与金钩河出山口; T<sub>6</sub> 阶地发育最为广泛, 阶地上覆较厚层的黄土; T<sub>5</sub> 阶地最大特点是阶地面宽阔平坦; T<sub>2</sub> 阶地基本连续地分布于现代河床两侧, 阶地面窄但较为平坦。除了背斜段 T<sub>6</sub> 阶地由于受到侵蚀作用而仅残留于孤峰之上外, T<sub>6</sub>、T<sub>5</sub> 以及 T<sub>2</sub> 等 3 级阶地在天山北麓各河流上下游基本连续发育, 阶地发育特征表明其分别与文献[41]划定的 III、II、I 级阶地对应。而 T<sub>4</sub> 和 T<sub>3</sub> 等 2 级阶地分布范围有限, 仅在背斜段发育, T<sub>1</sub> 阶地则分布在现代河谷的局部地段, 拔河一般 1~2 m。

### 3.1 T<sub>7</sub> 阶地

T<sub>7</sub> 阶地以玛纳斯河东岸早卡子沟 T<sub>7</sub> 阶地最为典型 (图 2a, 图 3a)。阶地类型为覆盖基座阶地, 阶地拔河 153 m; 阶地砾石层较厚, 砾石大小不一, 分选差, 磨圆次棱角—

(a) 玛纳斯河东岸早卡子沟 T<sub>7</sub>、T<sub>6</sub> 阶地(b) 鹿角湾公路 258 km 处 T<sub>6</sub> 阶地上覆黄土

图 3 天山北麓河流阶地及上覆黄土

Fig. 3 Photos showing the terraces and the loess profile along the northern piedmont of the Tianshan Mountains

表 2 天山北麓河流阶地上覆黄土特征

Tab. 2 Characteristics of the loess deposited on the terraces along the northern piedmont of the Tianshan Mountains

阶地 编号	上覆黄土 厚度/m	性状	粒度	古土壤	典型剖面
T <sub>7</sub>	40~50	下层黄褐色-深棕色: 结构较紧密, 粘性重, 含少量钙质结核及腹足类化石	细砂 5%~10%, 粉砂 63%~66.8%, 粘土 25%~28%	底部有古土壤发育, 采集 ESR 年代样品	早卡子 沟剖面
T <sub>6</sub>	10~30	浅棕色或灰黄色, 外观较均匀, 上部较疏松, 下部较坚实, 有虫孔、根孔等孔洞构造	细砂 1%~5%, 粉砂 51%~71.5%, 粘土 5.5%~27%	S <sub>0</sub> 、S <sub>1</sub> 、S <sub>2</sub> 、S <sub>3</sub> , 在 S <sub>2</sub> 层中采集 ESR 年代样品	鹿角湾 剖面

次圆。在阶地砾石层之上覆盖厚层的黄土堆积。黄土底部呈黄褐色—深棕色, 中上部呈浅黄色或灰黄色(表 2)。黄土结构较紧密、坚实, 粘性重, 粘粒含量最高可达 28%。剖面中发现少量钙质结核。该级阶地上覆黄土中古土壤发育很弱, 除了在底部可确认有古土壤发育外, 其他层位未曾见到。由于受到后期流水作用的改造, 阶地面上冲沟发育, 呈波状起伏, 指示其形成较早。

### 3.2 T<sub>6</sub> 阶地

T<sub>6</sub> 阶地在天山北麓发育最好, 分布范围广泛。阶地拔河高度在不同流域以及背斜两翼有很大差别(表 3)。在河流出山口附近阶地拔河高度达到最大, 金钩河 T<sub>6</sub> 阶地在公路桥附近达 268 m, 玛纳斯河 T<sub>6</sub> 阶地在红沟煤矿拔河 240 m。往下游方向 T<sub>6</sub> 阶地拔河逐渐减小, 但在背斜核部处阶地拔河高度明显增大(表 3), 如塔西河水文站南 1 km 处 T<sub>6</sub> 拔河 159 m, 玛纳斯河红山嘴 T<sub>6</sub> 阶地拔河 105 m, 这指示阶地变形明显受背斜构造活动的控制。在背斜段阶地类型均为基座阶地。野外考察发现, T<sub>6</sub> 阶地面呈波状起伏, 但与 T<sub>7</sub> 阶地面相比, 起伏幅度要稍小。同 T<sub>7</sub> 阶地一样, T<sub>6</sub> 阶地也具有典型的“二元”结构(图 2a, c), 下部为冲洪积砾石层, 砾石分选差、磨圆程度较好, 阶地上覆厚层黄土(表 2)。若论天山北麓河流各级阶地面上覆黄土的分布范围, 以该级阶地上覆黄土的分布最为广泛, 图 3b 便是 T<sub>6</sub> 阶地上的典型黄土剖面。

### 3.3 T<sub>5</sub> 阶地

T<sub>5</sub> 阶地的最大特点是阶地面平坦宽阔, 基本没有冲沟发育, 这表明其形成时间较晚。在不同流域, T<sub>5</sub> 阶地具有不同的发育特征。在金钩河两岸 T<sub>5</sub> 阶地发育程度存在差异, 河西岸阶地面要比河东岸宽许多, 尤其在泥火山一带, 阶地面宽超过 500 m(图 2b), 东岸则由于受到侵蚀而变得不连续。在金钩河水文站北, T<sub>5</sub> 阶地便过渡为一期冲积扇。塔西

表 3 天山北麓 T<sub>6</sub> 阶地拔河高度Tab. 3 Height of T<sub>6</sub> above the river along the northern piedmont of the Tianshan Mountains

塔西河	测量点	黄台子村	西凉户二队	西凉户	喀腊杂什萨依 沟口	水文站 南 1 km (背斜核部)	水文站	十间房 南 1 km
	拔河/m	142	132	98	102	159	144	93
玛纳斯河	测量点	红沟煤矿	坎苏瓦特	配种站	四大队五队	乔汉	红山嘴 (背斜核部)	五级 电站
	拔河/m	240	185	180	151	96	105	21

河 T<sub>5</sub> 阶地主要发育在河东岸, 阶地面平坦宽阔, 西岸的 T<sub>5</sub> 阶地则由于受到侵蚀基本没有保留下来, 该级阶地在塔西河水文站北与一期冲积扇呈过渡关系。天山北麓 T<sub>5</sub> 阶地具备典型的“二元”结构, 下部为厚层的砾石堆积, 上覆厚约 1 m 的粉砂。

### 3.4 T<sub>4</sub> 及以下各级阶地

T<sub>4</sub> 及以下各级阶地拔河相对于上述 3 级阶地而言要小, 属于河流低阶地。其中 T<sub>4</sub> 和 T<sub>3</sub> 阶地分布范围有限, 仅在背斜段发育, 阶地类型均为基座阶地。T<sub>2</sub> 阶地基本连续地分布于现代河床两侧, 阶地面窄但较为平坦, 阶地拔河一般 5 m 左右, 在河口处与现代冲积扇呈过渡关系。T<sub>1</sub> 阶地则不连续地分布在现代河谷内, 拔河一般 1~2 m。

## 4 阶地年代

前人对于天山北麓河流阶地发育年代的看法存在很大分歧<sup>[14, 38-41]</sup>, 其原因之一是对阶地分级存在差异; 二是由于所运用的定年手段不同。为了准确测定天山北麓河流阶地的年代, 笔者综合运用电子自旋共振测年法 (ESR)、光释光测年法 (OSL) 与黄土—古土壤序列对比分析等。ESR、OSL 年代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完成(表 4、5)。表 4 数据说明, 天山北麓不同河流下切形成 T<sub>6</sub> 阶地的时间存在差异, 阶地形成时限在 0.3~0.2 Ma BP 之间。T<sub>5</sub> 阶地的测年结果(表 5)与 Molnar 等<sup>[14]</sup>采用宇宙成因核素方法测得的奎屯河 II 级阶地(即本文的 T<sub>5</sub>)的年代基本一致。

鹿角湾黄土剖面研究为上述测年结果提供了佐证。该剖面位于安集海河支流头道沟出山口东岸、鹿角湾公路 258 km 处, 剖面厚约 8 m, 可明显识别出 4 个古土壤层(图 3b)。黄土层呈浅棕色或灰黄色, 外观比较均匀, 质地较疏松。古土壤层颜色明显要深, 一般呈棕色或棕黄色, 与黄土过渡带见少量小的钙质结核。剖面顶部为黑垆土, 较薄,

表 4 天山北麓河流阶地 ESR 年代样品的年剂量、古剂量及 ESR 年龄

Tab. 4 Calculated values of annual doses, equivalent doses and ESR ages

室内编号	送样号	采样部位	样品物质	古剂量 (Gy)	年剂量 (Gy/Ka)	年龄 (ka)
6575	HKZG.2	早卡子沟 T <sub>7</sub> 阶地上覆黄土底部古土壤层	粉砂质粘土	1854±195	3.45	537±56
6574	LujW.1	鹿角湾 T <sub>6</sub> 阶地上覆黄土的第 3 层古土壤	粉砂质粘土	869±90	3.37	257±27
7227	AJH-01	安集海河元兴畜牧队西 3 km T <sub>6</sub> 阶地	粉砂	1124±112	3.9	288±28
7228	TXH-01	塔西河黄台子村 T <sub>6</sub> 阶地上覆黄土底部	黄土	700±70	3.19	219±21

表 5 天山北麓河流阶地 OSL 年代样品的环境剂量率、等效剂量及 OSL 年龄

Tab. 5 Calculated values of annual doses, equivalent doses and OSL ages

室内编号	送样号	采样部位	样品物质	环境剂量率 (Gy/ka)	等效剂量 (Gy)	年龄(ka)
LEDL07-181	TXH-02	塔西河 T <sub>1</sub> 阶地	粉砂	3.8±0.4	6.7±0.3	1.8±0.2
LEDL07-183	JGH-02	金钩河 T <sub>5</sub> 阶地	粉砂质粘土	4.5±0.5	130.5±4.2	28.7±3.0

呈灰黑色,厚度在 10~15 cm 间变化,其下的古土壤稍厚,约 20 cm。剖面下部的古土壤层分别厚约 20 cm 和 30 cm,中间为一层厚约 2.0 m 的黄土。磁化率测试结果表明(图 4),鹿角湾剖面中存在 3 个磁化率值相对较高的层位,对应于剖面下部的 3 个古土壤层。与黄土高原东北缘武威黄羊镇剖面<sup>[45]</sup>同时期磁化率曲线的对比结果显示(图 4),鹿角湾剖面中磁化率较高的古土壤层分别对应于黄土高原的  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 。按黄土高原的惯例,将鹿角湾黄土剖面中由上往下的 4 层古土壤依次标记为  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 。可见,黄土—古土壤序列对比分析所指示的第 3 层古土壤  $S_2$  的年代与 ESR 年龄有很好的—致性,据此认为鹿角湾黄土剖面底界年龄可用  $S_3$  古土壤层的年龄来界定,由此推断,鹿角湾  $T_6$  阶地形成时间为约 0.3 Ma BP。

根据 ESR 与 OSL 测年、黄土—古土壤序列对比分析,并参考前人成果,本文给出天山北麓 7 级河流阶地年代(表 6)。

## 5 讨论

### 5.1 山前主要河流阶地与冲积扇关系

天山北麓发育 7 级河流阶地,其中  $T_6$ 、 $T_5$  及  $T_2$  等 3 级阶地分别对应于文献<sup>[34, 41]</sup>确定的 III、II、I 级阶地。野外考察表明,阶地发育与冲积扇关系密切,  $T_7$ 、 $T_6$ 、 $T_5$  及  $T_2$  等主要阶地为河流下切先期冲积扇而形成,阶地面与冲积扇面连为一体。本文把与  $T_7$ 、 $T_6$ 、 $T_5$  及  $T_2$  等 4 级阶地对应的 4 期冲积扇分别称为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  期冲积扇(图 5),其中  $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  期冲积扇分别与文献<sup>[34, 41]</sup>确定的 I、II、III 期冲积扇对应。天山北麓由逆断裂控制的背斜带的形成时间从南向北由老到新<sup>[34, 42]</sup>,这说明天山北麓的构造隆升呈现向北迁移的趋势,山麓地带抬升范围不断向北扩大,从而造成不同时期的冲积扇顶点不断向北迁移,以至上述 4 期冲积扇呈串珠状发育,其中  $F_3$  与  $F_4$  期冲积扇还具有内迭特征

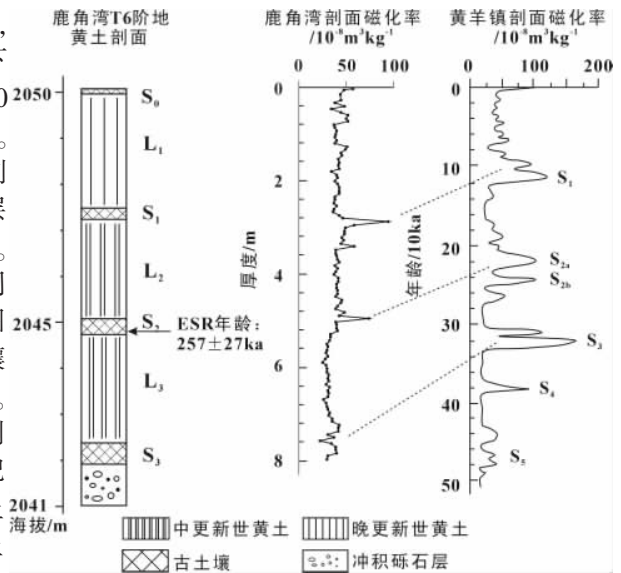


图 4 天山北麓鹿角湾  $T_6$  阶地黄土剖面与黄羊镇剖面<sup>[45]</sup>磁化率对比

Fig. 4 Comparison of the magnetic susceptibility of the loess at Lujiaowan along the northern piedmont of the Tianshan Mountains with that at Huangyang Town<sup>[45]</sup>

表 6 天山北麓河流阶地的年代

Tab. 6 Ages of terraces along the northern piedmont of the Tianshan Mountains

阶地级序	年代/10kaB.P.	资料来源
$T_7$	54	ESR 测年
$T_6$	30~20	ESR 测年, 黄土-古土壤序列
$T_5$	2.8~0.8	OSL 测年, Molnar et al. <sup>[14]</sup>
$T_4$	晚更新世晚期	本文推测
$T_3$	1.2	史兴民等 <sup>[35]</sup> , 徐锡伟等 <sup>[46]</sup>
$T_2$	全新世早期	本文推测
$T_1$	0.18	OSL 测年

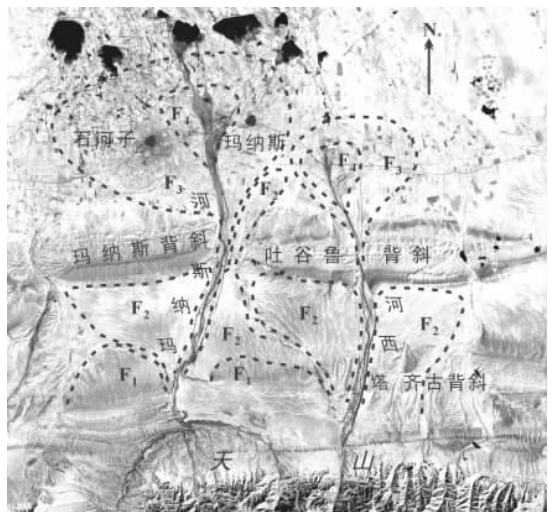


图 5 玛纳斯河与塔西河流域山前冲积扇期次

Fig. 5 Fans in the drainage area of Manas and Taxi rivers

(图 5)。而且,在背斜带间的向斜地带发育的冲积扇(如  $F_1$ 、 $F_2$ ),其形态不规则,而在背斜带之外,由于没有背斜带的限制,冲积扇(如  $F_3$ 、 $F_4$ )扇形形态完整(图 5)。

### 5.2 天山更新世冰期与河流地貌发育

天山位于欧亚大陆腹地,属于典型的内陆半干燥气候,山前冲积地貌发育与冰期间冰期的气候变化有着紧密联系<sup>[14, 31, 47]</sup>。阶地年代表明(表 6), $T_7$ 阶地沉积物及  $F_1$ 期冲积扇堆积发生在红山嘴冰期,河流下切形成阶地发生在之后的间冰期,约 0.54 Ma 的形成年代也说明该级阶地下切形成时间与黄土高原古土壤层  $S_5$  及深海氧同位素 MIS15 阶段基本同期; $T_6$ 阶地沉积物及  $F_2$ 期冲积扇堆积发生在哈熊沟冰期(与高望峰冰期同期),在之后的间冰期河流切割冲积扇形成阶地; $T_5$ 阶地沉积物及  $F_3$ 期冲积扇堆积则发生在乌达特冰期(与上望峰冰期同期),河流下切形成阶地则在之后的间冰期。从测年结果上看,与呼斯台冰期(与下望峰冰期同期)间冰期旋回对应的冲积地貌未能发现,这可能是由于后期气候、构造事件导致此时期形成的冲积地貌不复存在,也可能缘于此时期构造抬升使沉积区变为非沉积区。上述河流地貌发育与天山冰期的对应关系有别于文献[41]的结论。文献[41]推测,III级阶地(即  $T_6$ )砾石层沉积与对应冲积扇堆积于 0.17~0.14 Ma BP 的下望峰冰期;本文根据 ESR 年龄和黄土—古土壤序列对比,认为  $T_6$ 阶地沉积与  $F_2$ 期冲积扇堆积发生在 0.3~0.2 Ma BP 的高望峰冰期(表 7)。

表 7 天山北麓主要河流阶地、冲积扇及天山更新世冰期

Tab. 7 Fluvial terraces, corresponding alluvial fans and the Pleistocene ice ages

阶地/冲积扇	年代/10kaB.P.	玛纳斯河源冰期 <sup>[30]</sup>	乌鲁木齐河源冰期 <sup>[30]</sup>			
级序/期次	下切	堆积	冰期	时代	冰期	时代/10ka BP
$T_2/F_4$	全新世早期	-	-	-	-	-
$T_5/F_3$	2.8~0.8	乌达特冰期	乌达特冰期	晚更新世晚期	上望峰冰期	(6~7)~2
-	-	-	呼斯台冰期	晚更新世早期	下望峰冰期	17~14
$T_6/F_2$	30~20	哈熊沟冰期	哈熊沟冰期	中更新世晚期	高望峰冰期	30~20
$T_7/F_1$	54	红山嘴冰期	红山嘴冰期	中更新世早期	-	-

### 5.3 天山北麓气候、构造因素共同控制下的河流地貌演化

根据天山北麓 3 排背斜带的形成过程<sup>[34, 42]</sup>、天山更新世冰期发育<sup>[30]</sup>以及上述冲积扇与阶地的对应关系,给出如下的天山北麓河流地貌演化过程。

中更新世时期,早先形成的褶皱低山丘陵由于受到外营力作用而普遍遭到侵蚀。红山嘴冰期的冷干气候使得河流携带物质的能力降低,大量物质堆积于山前,第一期冲积扇( $F_1$ )开始堆积形成。在与黄土高原古土壤层  $S_5$  及深海氧同位素 MIS15 阶段同期的间冰期,气候由冷干转为暖湿,水量增大导致河流下切侵蚀作用增强,河流由堆积形成冲积扇转而下切形成阶地( $T_7$ ),冲积扇加积状态停止,开始接受黄土堆积。

哈熊沟冰期(与高望峰冰期同期)重新使天山北麓河流发生堆积作用,形成第二期冲积扇( $F_2$ )。 $F_2$ 期冲积扇发育广泛,填充了第 I 排与第 II 排背斜之间的向斜谷地,但由于受到背斜带的限制,冲积扇形态不规则。在之后的间冰期,河流下切侵蚀形成  $T_6$ 阶地。

自中更新世晚期以后,天山北麓未发生大规模强烈的构造活动,但研究表明<sup>[35]</sup>,第 II 排与第 III 排背斜继续活动,并呈向盆地方向迁移的趋势,这使得在乌达特冰期(与上望峰冰期同期)形成的  $F_3$ 期冲积扇及全新世早期形成的  $F_4$ 期冲积扇越过背斜成串珠状发育。

致谢: ESR、OSL 年代测定得到了中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室的陈杰研究员、刘进峰研究员、李建平老师以及王昌盛博士等的指导与热心帮助,北京大学城市与环境学院的王红亚教授为磁化率的测试提供了方便,在此一并表示衷心的感谢!

## 参考文献 (References)

- [1] Sun J M, Zhu R X, Bowler J. Timing of the Tianshan Mountains uplift constrained by magnetostratigraphic analysis of molasses deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219: 239-253.
- [2] Sun J M, Zhu R X, An Z S et al. Tectonic uplift in the northern Tibetan Plateau since 13.7 Ma ago inferred from molasses deposits along the Altyn Tagh Fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 235: 641-653.
- [3] Charreau J, Chen Y, Gilder S, et al. Magnetostratigraphy and rock magnetism of the Neogene Kuitun He section (northwest China): Implications for Late Cenozoic uplift of the Tianshan Mountains. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 230: 177-192.
- [4] Charreau J, Gilder S, Chen Y et al. Magnetostratigraphy of the Yaha section, Tarim Basin (China): 11 Ma acceleration in erosion and uplift of the Tianshan Mountains. *Geology*, 2006, 34(3): 181-184.
- [5] Chen J, Burbank D W, Scharer K M et al. Magnetostratigraphy of the Upper Cenozoic strata in the Southwestern Chinese Tian Shan: Rates of Pleistocene folding and thrusting. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 195: 113-130.
- [6] Huang B C, Piper J D A, Peng S T et al. Magnetostratigraphic study of the Kuche Depression, Tarim Basin, and Cenozoic uplift of the Tian Shan Range, Western China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 251: 346-364.
- [7] Sun Z M, Yang Z Y, Pei J L et al. Magnetostratigraphy of Paleogene sediments from northern Qaidam Basin, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237: 635-646.
- [8] Burbank D W, Reynolds R G H. Sequential late Cenozoic structural disruption of the northern Himalayan foredeep. *Nature*, 1984, 311: 114-118.
- [9] Li Y L, Yang J C, Tan L H et al. Impact of tectonics on alluvial landforms in Hexi Corridor, Northwest China. *Geomorphology*, 1999, 28: 229-308.
- [10] Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou et al. Geomorphological and environmental evolution in the upper reaches of the Yellow River during the Late Cenozoic. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(4): 316-322. [李吉均, 方小敏, 马海洲等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起. *中国科学 (D辑)*, 1996, 26(4): 316-322.]
- [11] Gao Hongshan, Pan Baotian, Wu Guangjian et al. Erosion surfaces in the eastern Qilian Mountains and uplift of the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 540-544. [高红山, 潘保田, 邬光剑等. 祁连山东段剥蚀面与青藏高原隆升. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 540-544.]
- [12] Lu Huayi, An Zhisheng, Wang Xiaoyong et al. Geomorphologic evidences of uplift of northeastern Qinghai-Xizang plateau since 14 Ma BP. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(9): 855-864 [鹿化熠, 安芷生, 王晓勇等. 最近 14Ma 青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据. *中国科学 (D辑)*, 2004, 34(9): 855-864.]
- [13] Li Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian et al. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 381-391. [李吉均, 方小敏, 潘保田等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. *第四纪研究*, 2001, 21(5): 381-391.]
- [14] Molnar P, Brown E T, Burchfiel B C et al. Quaternary climate change and the formation of river terraces across growing anticlines on the north flank of the Tien Shan, China. *Journal of Geology*, 1994, 102: 583-602.
- [15] Westaway R, Bridgland D, White M. The Quaternary uplift history of central southern England: Evidence from the terraces of the Solent River system and nearby raised beaches. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25: 2212-2250.
- [16] Hanson P R, Mason J A, Goble R J. Fluvial terrace formation along Wyoming's Laramie Range as a response to increased late Pleistocene flood magnitudes. *Geomorphology*, 2006, 76: 12-25.
- [17] Han Zhiyong, Li Xusheng, Ren Xuemei et al. Dating of river terraces in the Three Gorges Reservoir area. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1200-1207. [韩志勇, 李徐生, 任雪梅等. 三峡库区长江阶地冲积物的年代测定. *地理学报*, 2006, 61(11): 1200-1207.]
- [18] Li Youli, Yang Jingchun. Response of alluvial terraces to Holocene climatic changes in the Hexi Corridor basins, Gansu, China. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 13(3): 248-252. [李有利, 杨景春. 河西走廊平原区全新世河流阶地对气候变化的响应. *地理科学*, 1997, 13(3): 248-252.]
- [19] Yang Jingchun, Tan Lihua, Li Youli et al. River terraces and Neotectonic evolution at north margin of the Qilianshan Mountains. *Quaternary Sciences*, 1998, (3): 229-237. [杨景春, 谭利华, 李有利等. 祁连山北麓河流阶地与新构造演化. *第四纪研究*, 1998, (3): 229-237.]
- [20] Ma Baoqi, Li Ke, Wu Weimin et al. Features and neotectonic significance of river valley landforms in Mt. Daqingshan. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(4): 327-334. [马保起, 李克, 吴卫民等. 大青山河谷地貌特征及新构造意义. *地理学报*, 1999, 54(4): 327-334.]
- [21] Pan Baotian, Li Jijun, Zhu Junjie et al. Terraces and the tectonic-climatic cycles in the middle reach of Yellow River. In: *Geomorphology·Environment·Development*. Beijing: China Environmental Science Press, 1995. 26-30. [潘保田, 李吉均, 朱俊杰等. 黄河中游阶地与构造-气候旋回. 见: *地貌·环境·发展*. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. 26-30.]



- [22] Gregory S, Robert S, Oliver A. Dating fluvial terraces with  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  profiles: Application to the Wind River, Wyoming. *Geomorphology*, 1999, 27: 41-60.
- [23] Edward J B Erik T B, Mark D Kurz et al. Constraints on age, erosion, and uplift of Neogene glacial deposits in the Transantarctic Mountains determined from in situ cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$ . *Geology*, 1995, 23(12): 1063-1066.
- [24] Paul R, Kimberly A, Carrie P et al. Mid-Pleistocene cosmogenic minimum-age limits for pre-Wisconsinan glacial surfaces in southwestern Minnesota and southern Baffin Island: A multiple nuclide approach. *Geomorphology*, 1999, 27: 25-39.
- [25] Xu Xiaobin, Wang Jian, Françoise Y et al. New means in the study of geomorphology and Quaternary: Research of terrestrial cosmogenic isotopes. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(5): 587-591. [徐孝彬, 王建, Franoise Y 等. 地貌学与第四纪研究的新手段: 陆地宇生核素研究. *地理科学*, 2002, 22(5): 587-591.]
- [26] Xu Liubin, Zhou Shangzhe. Theory of cosmogenic nuclide surface exposure dating and its applications in geoscience. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 577-585. [许刘兵, 周尚哲. 宇宙成因核素测年方法及其在地球科学中的应用. *冰川冻土*, 2006, 28(4): 577-585.]
- [27] Huang Xiangtong, Zheng Hongbo, John C. Terrestrial cosmogenic nuclides  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$ . *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005, 33(9): 1206-1212. [黄湘通, 郑洪波, John C. 宇宙成因核素  $^{10}\text{Be}$  和  $^{26}\text{Al}$ . *同济大学学报 (自然科学版)*, 2005, 33(9): 1206-1212.]
- [28] Lai Zhongping, Zhou Jie, Lou Yanchou et al. Comparison of IRSL and GLSL dating of aeolian sediments. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2000, 20(1): 57-61. [赖忠平, 周杰, 卢演涛 等. 风成沉积物红外及绿光释光测年比较研究. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(1): 57-61.]
- [29] Yin Gongming, Lin Min. Present status of ESR dating of sediments. *Nuclear Techniques*, 2005, 28(5): 399-402. [尹功明, 林敏. 沉积物电子自旋共振测年现状. *核技术*, 2005, 28(5): 399-402.]
- [30] Xinjiang Institute of Geography, CAS. Evolutions of the Tianshan Mountains. Beijing: Science Press, 1986. 16-49, 80-116. [中国科学院新疆地理研究所. 天山山体演化. 北京: 科学出版社, 1986. 16-49, 80-116.]
- [31] Avouac J P, Tapponnier P, Bai M et al. Active thrusting and folding along northern Tianshan, and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzhungaria and Kazakhstan. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 6755-6804.
- [32] Yin A, Nie S. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan. *Tectonics*, 1998, 17(1): 1-27.
- [33] Burchfiel B C, Brown E T, Deng Q D et al. Crustal shortening on the margins of the Tien Shan, Xinjiang, China. *International Geological Review*, 1999, 41: 665-700.
- [34] Deng Qidong, Feng Xianyue, Zhang Peizhen et al. Active Tectonics of the Tianshan Mountains. Beijing: Seismology Press, 2000. 399. [邓起东, 冯先岳, 张培震 等. 天山活动构造, 北京: 地震出版社, 2000. 399.]
- [35] Shi Xingmin, Yang Jingchun, Li Youli et al. Deformation of Manas River terraces and neotectonics in northern front of the Tianshan Mountains. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2004, 40(6): 971-978. [史兴民, 杨景春, 李有利 等. 天山北麓玛纳斯河河流阶地变形与新构造运动. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2004, 40(6): 971-978.]
- [36] Zhang Rui, Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng. Structural analysis of the Dushanzi-Anjihai Late Cenozoic fold-thrust belt and its influence on river channels, north Tianshan. *Xinjiang Geology*, 2005, 23(3): 215-219. [张锐, 郭召杰, 张志诚. 天山北麓晚新生代独山子—安集海褶皱冲断带构造分析及其对河流改道的影响. *新疆地质*, 2005, 23(3): 215-219.]
- [37] Yuan Qingdong, Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng et al. Deformation of Taxi River terraces on the north flank of the Tian Shan. *Xinjiang Geology*, 2004, 22(1): 83-86. [袁庆东, 郭召杰, 张志诚 等. 天山北麓塔西河河流阶地的变形特征及成因探讨. *新疆地质*, 2004, 22(1): 83-86.]
- [38] Fang Xiaomin, Shi Zhengtao, Yang Shengli et al. Loess in Kunlun Mountains and its implications for desert development and Tibetan Plateau uplift in west China. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(7): 540-545. [方小敏, 史正涛, 杨胜利 等. 天山黄土和古尔班通古特沙漠发育及北疆干旱化. *科学通报*, 2002, 47(7): 540-545.]
- [39] Wang Yong, Wang Yanbin. Formation of Anjihai River terraces at the north Tianshan piedmont, Xinjiang, and significance. *Geological Review*, 2000, 46(6): 584-587. [王永, 王彦斌. 北天山山前安集海河阶地形成的时代及意义. *地质论评*, 2000, 46(6): 584-587.]
- [40] Yuan Qingdong, Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng et al. The late Cenozoic deformation of terraces on the north flank of Tianshan Mountains and the tectonic evolution. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(2): 210-216. [袁庆东, 郭召杰, 张志诚 等. 天山北缘河流阶地形成及构造变形定量分析. *地质学报*, 2006, 80(2): 210-216.]
- [41] Zhang Peizhen, Deng Qidong, Yang Xiaoping et al. Glaciofluvial fan and neotectonic along the north piedmont of Tianshan Mountains. In: *Research of Active Fault (IV)*, Editing Committee of the Research of Active Fault. Beijing: Seismology Press, 1995. 63-78. [张培震, 邓起东, 杨晓平 等. 天山北麓的冰水冲洪积扇与新构造运动. 见: *活动断裂研究 (IV)*. 北京: 地震出版社, 1995. 63-78.]
- [42] Fang Shihu, Jia Chengzao, Guo Zhaojie et al. Age of the foreland thrust-fault belt along southern edge of Junggar Basin. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 66. [方世虎, 贾承造, 郭召杰 等. 准噶尔盆地南缘前陆冲断带形成时间

的初步厘定. 地学前缘, 2005, 12(3): 66.]

- [43] Zhang Peizhen, Deng Qidong, Xu Xiwei et al. Tectonic deformation, crustal shortening, and slip rate estimation along the Manas reverse fault-fold zone in the northern flank of the Tian Shan Mountains. In: Research of Active Fault (III), Editing Committee of the Research of Active Fault. Beijing: Seismology Press, 1994. 18-32. [张培震, 邓起东, 徐锡伟等. 天山北麓玛纳斯活动逆断裂—褶皱带的变形特征与构造演化. 见: 活动断裂研究 (III), 活动断裂研究编辑委员会, 北京: 地震出版社, 1994. 18-32.]
- [44] Hendrix M S, Dumitru T A, Graham S A. Late Oligocene-early Miocene unroofing in the Chinese Tian shan: An early effect of the India-Asia collision. *Geology*, 1994, 22: 487-490
- [45] Wu Haibin, Guo Zhengtang, Fang Xiaomin et al. Spreading of the arid area of north China at 250 ka BP and its origin. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(17): 1341-1346. [吴海斌, 郭正堂, 方小敏等. 250ka BP 前后中国北方干旱区扩张及其成因. 科学通报, 2002, 47(17): 1341-1346.]
- [46] Xu Xiwei, Deng Qidong, Zhang Peizhen et al. Deformation of river terraces across the Manas-Huoerguos reverse fault and fold zone and its Neotectonic implication in Xinjiang, northwestern China. In: Editing Committee of the Research of Active Fault. Research of Active Fault (II). Beijing: Seismology Press, 1992. 117-126. [徐锡伟, 邓起东, 张培震等. 新疆玛纳斯—霍尔果斯逆断裂—褶皱带河流阶地的变形及其构造含义. 见: 活动断裂研究编辑委员会. 活动断裂研究(II). 北京: 地震出版社, 1992. 117-126.]
- [47] Bull W B. Stream-terrace genesis: Implications for soil development. *Geomorphology*, 1990, 3: 351-367.

## Sequences and Ages of Fluvial Terraces along the Northern Piedmont of the Tianshan Mountains

LU Honghua<sup>1</sup>, LI Youli<sup>1</sup>, NAN Feng<sup>2</sup>, SI Supei<sup>1</sup>,  
LIU Yunming<sup>1</sup>, QIAN Mang<sup>1</sup>, ZHAO Hongzhuang<sup>1</sup>

(1. *College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China;*

2. *Higher Education Press, Beijing 100029, China)*

**Abstract:** The northern piedmont of the Tianshan Mountains, which is characterized by three parallel ridges of anticlines, known as Fold-and-Thrust zones I-III from the mountains towards the foreland basin, and north-flowing rivers, is a typical region containing many scientific problems attracting a lot of geologists and geographers. Under the special geological setting, the terraces developing along these rivers contain a lot of information on climatic changes and tectonic movement. However, previous studies on fluvial terraces in the northern piedmont of the Tianshan Mountains are still divergent. This work tries to solve the problem and well understand the sequences and ages of fluvial terraces along the northern piedmont of the Tianshan Mountains. The seven fluvial terraces named as  $T_1$  to  $T_7$  developed along major river channels in the northern piedmont of the Tianshan Mountains, and some main and consecutive terraces correspond to some fans. The fans corresponding to  $T_7$ ,  $T_6$ ,  $T_5$  and  $T_2$  are respectively named as  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  and  $F_4$ . Because the center of the upheaval migrated from south to north in the process, some fans developed one by one. But the limit of the anticlines leads to the anomalistic shape of some fans between two anticlines. According to the ESR age, OSL age, and loess-paleosol series, the highest terrace ( $T_7$ ), corresponding to the oldest alluvial fan ( $F_1$ ) which is covered by thick loess and strongly dissected, is dated as 0.54 Ma BP. The higher terrace ( $T_6$ ) corresponds to  $F_2$ , and the surface of  $T_6$  and  $F_2$  is also covered by thick loess and dissected by gullies, some of which were abandoned. The age of  $T_6$  is estimated as 0.3-0.2 Ma on the basis of the ESR age and loess-paleosol series.

**Key words:** fluvial terrace; alluvial fan; ESR; loess-paleosol series; the Tianshan Mountains