中国科学: 地球科学 2012 年 第 42 卷 第 12 期: 1877 ~ 1888
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

天山北麓活动褶皱带晚第四纪时期隆升的差异性

杨晓平*, 李安, 黄伟亮

中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室, 北京 100029
* E-mail: yangxiaopingdzs@sina.com

收稿日期: 2011-12-01; 接受日期: 2012-06-15
国家自然科学基金(批准号: 40572126)和地震行业科研专项(编号: 200808013)资助

摘要 奎屯河和玛纳斯河横切天山北麓的独山子背斜和玛纳斯背斜, 在背斜区分别形成 7 级和 6 级基座阶地, 为晚第四纪以来独山子背斜和玛纳斯背斜褶皱隆起的构造地貌标志. 在各阶地堆积物中系统采集了测年样品, 用细颗粒光释光简单多片再生法(SMAR)测年. 奎屯河 T1 阶地堆积物中采集到 ^{14}C 测年样品并测年. 测年结果显示, 它们均为晚更新世晚期以来的堆积物. 阶地堆积物测年结果和西北地区距今 200 ka 以来气候变化对比认为: 玛纳斯河 T1, T2, T3, T4 和 T5 阶地的形成年代分别为距今 6, 8.5, 10, 14 和 32 ka, 奎屯河 T1, T2, T3, T4, T5, T6 和 T7 阶地的形成年代分别为距今 1.7, 14, 20, 25, 32, 50 和 100 ka. 玛纳斯河 T4 阶地和奎屯河 T2 阶地形成于距今 14 ka 的晚更新世晚期. 距今 14 ka 以来玛纳斯河下切形成了 3 级基座阶地, 而奎屯河下切只形成了 1 级基座阶地. 独山子背斜最新一次褶皱隆升事件发生在距今 1.7 ka, 玛纳斯背斜最新一次褶皱隆升发生在距今 5 ka. 距今 14 ka 以来的晚更新世晚期以来, 独山子背斜、玛纳斯背斜的隆升量分别为 40 和 95 m, 隆升速率分别为 2.7 和 6.8 mm/a.

关键词
天山
河流阶地
光释光测年
晚第四纪
褶皱隆起

天山山系耸立于中亚腹地, 全长 2500 km, 宽度达 250~350 km, 是亚洲最主要的、规模巨大的年轻山系之一, 中国部分的天山夹持于新疆准噶尔和塔里木两大盆地之间, 东西延长达 1700 km, 平均海拔高度约为 4000 m, 许多山峰在海拔 5000 m 以上, 最高峰托木尔峰海拔高度达 7435.3 m, 天山新生代的隆起已经成为大陆动力学的研究的热点之一. 新生代以来印度和欧亚板块碰撞作用使得天山地区遭受了强烈的挤压缩短和隆升[1~3]. 这使得天山北侧由南向北形成三排中-新生代褶皱带, 而且这些褶皱带在晚第四纪时期有不同程度的活动, 一系列河流横切这些褶皱带并发育了多级河流阶地[4]. 通过对河流阶地的研究可以获取构造活动的信息. 鄂尔多斯高原、祁连山、天山和喜马拉雅等地区第四纪构造活动研究新进展就是对河流阶地的研究取得的[5~17]. 因此, 河流阶地的研究在创建构造演化和河流发展历史等方面有重要的意义[16,18]. 天山北麓发育三期冲积扇, 相应的这三期洪积扇被下切之后形成天山北麓河流 3 级主要的阶地[14,16,19]. 科技工作者对奎屯河、玛纳斯河等阶地进行过研究, 主要集中在对河流阶地的发育特征和褶皱隆升, 对河流阶地的形成年代有少量的直接测年结果[4,5,14,17,20], 但没有对奎屯河、玛纳斯河穿越活动褶皱段的河流阶地作系统的年代学研究, 也没有对天山北麓晚第四纪时期不同活动褶皱的差异隆起进行研究. 笔者对天山北麓的奎屯河和玛纳

英文引用格式: Yang X P, Li A, Huang W L. Uplift differential of active fold zones during the late Quaternary, northern piedmonts of the Tianshan Mountains, China. Science China: Earth Sciences, 2012, doi: 10.1007/s11430-012-4531-z

斯河穿越活动褶皱段的河阶地进行了野外科学考察, 精确测定了阶地砾石层顶面和底面的拔河高度、系统采集了各阶地堆积物的测年样品. 光释光测年是近几年发展起来的测定第四纪沉积物年龄的一种新技术. 本文用光释光测年技术测定了阶地沉积物的堆积年代, 结合晚第四纪气候变化厘定了阶地沉积物的堆积时代和阶地的形成时代, 进而对独山子活动褶皱和玛纳斯活动褶皱的隆起提出一些新的认识.

1 地质背景

乌鲁木齐山前坳陷发育于准噶尔盆地南缘, 呈东西向带状分布, 长达 300 km 以上, 南北宽 50~80 km, 是一个中新生代山前坳陷, 中新生界最厚达 12000 m. 各时代沉降中心由老至新从东向西迁移, 新生代不同时代地层之间大多为连续沉积, 其中下更新统西域组与上新统独山子组产状有轻微变化, 下更新统与中更新统之间则为不整合关系, 显示了最新构造活动. 乌鲁木齐山前坳陷大致以乌鲁木齐市为界分为东西两段, 以东为博格达推覆构造, 以西为北天山活动褶皱带. 北天山活动褶皱带南界为准噶尔南缘断裂, 它是天山再生造山带与乌鲁木齐山前坳陷的分界断裂, 也是二者在地貌上的分界线, 南侧天山山体海拔高达 3000~4000 m, 北侧山前坳陷内发育 3 排近东西向由背斜山岭组成的低山-丘陵区, 自南向北海拔高程分别为 1300~2100, 1000~1500 和 600~1200 m. 准噶尔南缘断裂总体走向为 280°~290°, 倾向南, 倾角 45°~75°, 为一长达 245 km 的逆冲断裂, 沿断裂见古生代地层逆冲于中新生代地层之上, 断裂在第四纪不同时期均有活动. 准噶尔南缘断裂以北, 乌鲁木齐山前坳陷内最南的第 1 排逆断裂-背斜带称为齐古逆断裂-背斜带. 在齐古逆断裂-背斜带以北约 20~30 km 发育了第 2 排逆断裂-背斜带, 即霍尔果斯-玛纳斯-吐谷鲁活动逆断裂-背斜带, 简称玛纳斯逆断裂-背斜带, 1906 年玛纳斯 7.7 级地震时沿该逆断裂发育不连续地表破裂带和同震隆起带[21]. 玛纳斯逆断裂-背斜带西段以北约十余公里处发育了第 3 排逆断裂-背斜带, 即独山子-安集海活动逆断裂-背斜带, 简称独山子逆断裂-背斜带. 该逆断裂-背斜带自西向东由独山子、哈拉安德和安集海等 3 个逆断裂-背斜组成, 其中独山子背斜核部地层为中新统, 两翼地层为上新统及下更新统(图 1). 独山子逆断裂-背斜带北翼陡、南翼缓, 北翼发育主逆冲断裂, 断裂上盘发育反冲逆断裂, 其中独山子背斜北翼靠近主逆冲断裂的中新统发生倒转, 断裂切割不同时代地层和河流阶地, 并使阶地发生褶皱变形[4].

2 奎屯河、玛纳斯河阶地划分和阶地堆积物的年代

2.1 活动背斜段河流阶地分布

利用高精度的遥感影像, 对奎屯河流经独山子背斜及南北两侧、玛纳斯河流经玛纳斯背斜及其南北

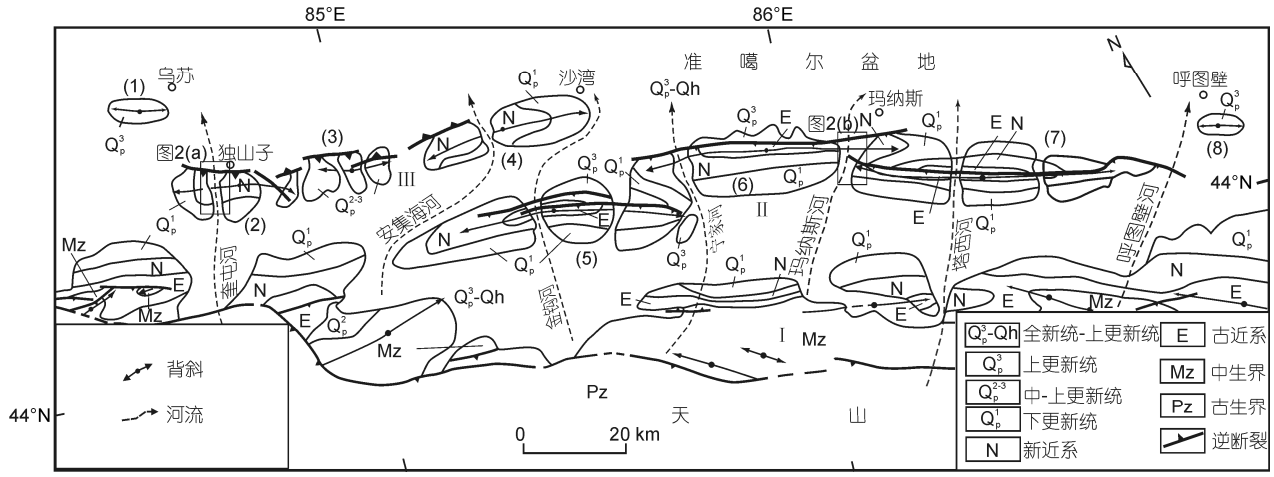


图 1 北天山活动逆断裂-背斜带分布图

Ⅰ: 齐古逆断裂-背斜带; Ⅱ: 玛纳斯逆断裂-背斜带; Ⅲ: 独山子逆断裂-背斜带; (1) 西湖隆起; (2) 独山子逆断裂-背斜; (3) 哈拉安德逆断裂-背斜; (4) 安集海逆断裂-背斜; (5) 霍尔果斯逆断裂-背斜; (6) 玛纳斯逆断裂-背斜; (7) 吐谷鲁逆断裂-背斜; (8) 呼图壁背斜

两侧进行了地貌解释, 发现奎屯河在独山子背斜北侧仅发育 1 级阶地, 且为堆积阶地[4], 而流经独山子背斜段的奎屯河发育 7 级阶地, 且均为基座阶地(图 2(a)). 在玛纳斯背斜以北玛纳斯河发育 1 级阶地, 为堆积阶地. 在玛纳斯背斜以南、齐古逆断裂-背斜带以北的玛纳斯河段发育 3 级阶地, 均为堆积阶地[4]. 玛纳斯河流经玛纳斯背斜时发育 6 级基座阶地(图 2(b)).

2.2　阶地堆积物的堆积年代测定

对奎屯河 T1~T7 阶地、玛纳斯河 T1~T5 阶地分别进行了断代样品采集, 并进行了光释光测年. 样品全部采集于地下 0.5~1.5 m, 成分为含粘土的粉砂和细砂, 或砂质粘土(图 3, 4). 对粉砂和细砂样品, 采用直径 8 cm、长 20 cm 的不锈钢管封装, 两头用锡箔纸包装; 对砂质粘土, 则采集重约 1.5 kg 的块状样品, 用锡箔纸包装. 各阶地堆积物采样位置的地质剖面如图 5. 上述两种包装的样品外层均用胶带密封, 保持地层原始的含水量. 样品测试由地震动力学国家重点实验室完成. 光释光测年方法适合于测定第四纪沉积物沉积年龄[22], 其中细颗粒矿物简单多片再生法(SMAR)是河流阶地沉积物释光测年最为使用的方法之一[23,24], 因此, 本批样品均采用简单多片再生法(SMAR)测定阶地堆积物的沉积年龄, 测试结果见表 1.

简单多片再生法用于细颗粒石英光释光测年是近年来发展的测年新技术. 王旭龙等[25]通过对洛川黄土剖面(35°45′N, 109°25′E)上部 12 m 深度内的地层, 包括全新世黑垆土(S_0)、末次冰期马兰黄土(L_1)和末次间冰期古土壤(S_1)进行了系统的简单多片再生法光释光测年, 测年结果证实了末次冰期马兰黄土开始堆积的时间约为 70 kaBP. MIS 5/4 的年龄为 74 ka[26], 二者具有良好的可比性, 证明了简单多片再生法的可靠性. 光释光测年方法是一种测年范围较广的晚第四纪沉积物断代方法, 当环境剂量率在 1~5 Gy/ka 时, 用石英作测年样品, 测年范围为 1~500 ka[27]. 本文中对阶地堆积物的测年采用石英细颗粒光释光测年方法, 测年结果最大值为 100 ka 左右, 测年结果在光释光测年方法有效的测年范围内, 测年结果可靠.

虽然细颗粒石英光释光测年的简单多片再生法(SMAR)是一种有效的测定沉积物堆积年龄的方法, 但由于每件测年对象本身的不同也会导致同一级阶地堆积物测年结果存在较大的差异. 其原因主要有: (1) 同一级阶地不同地点的堆积物堆积时代应在一个特定的时间段内, 但阶地堆积物的形成也不是在短时间内完成的, 而是要经历一定长时段, 先期形成的堆积物其沉积年龄本身就大于后期形成的堆积物; (2) 玛纳斯河、奎屯河阶地堆积物均为冲洪积物, 细颗粒物质在沉积之前受到的光晒退程度不一致, 部分样

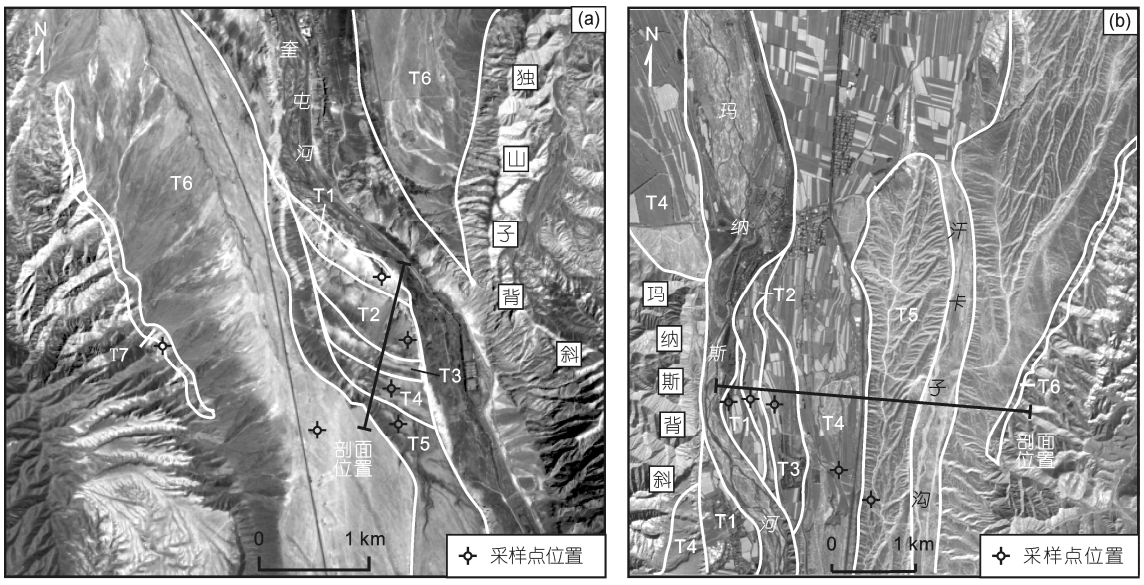


图 2　奎屯河、玛纳斯河流经活动背斜段阶地分布

(a) 奎屯河阶地分布; (b) 玛纳斯河阶地分布

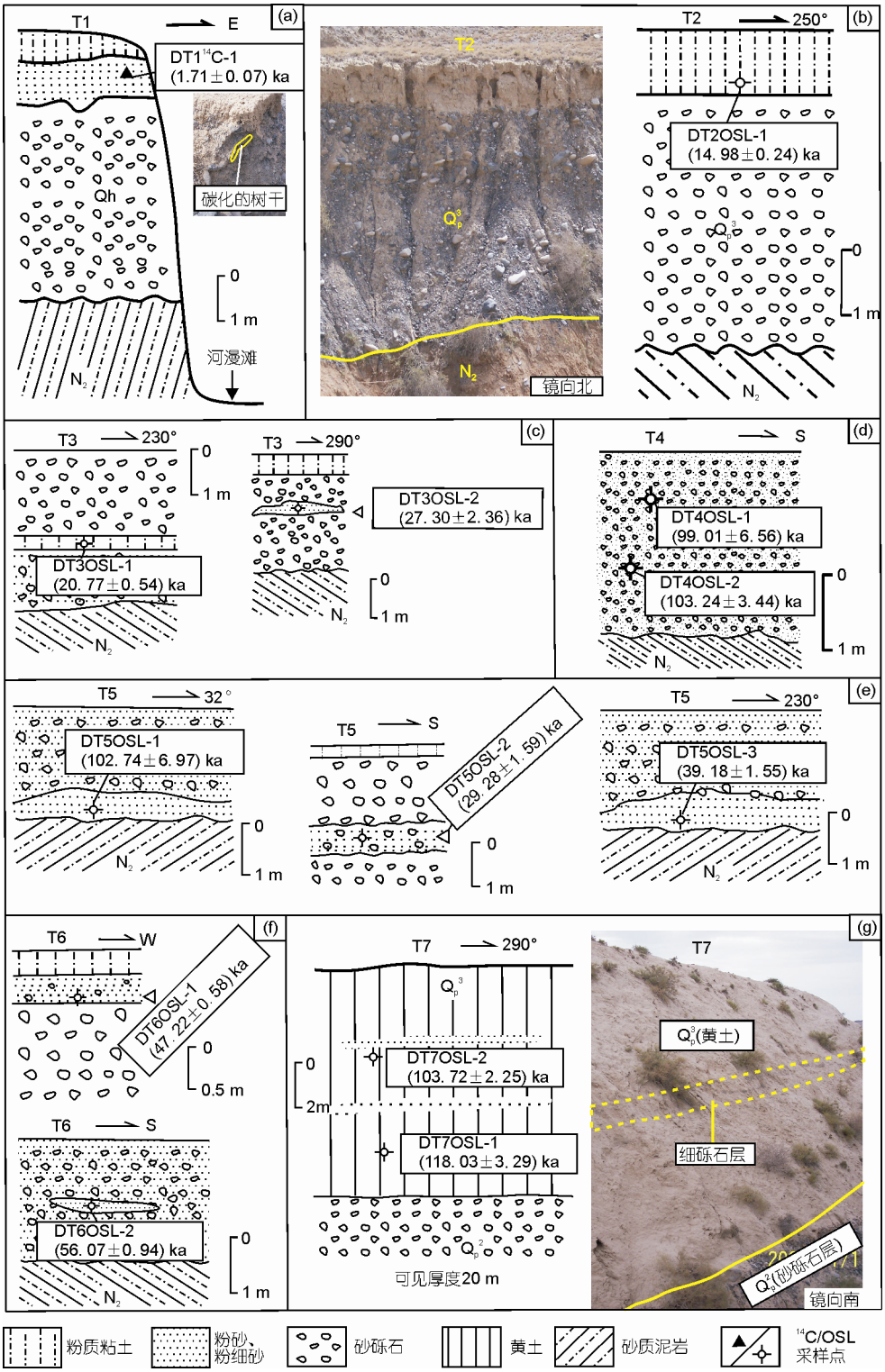


图 3　奎屯河阶地堆积物采样位置地层剖面

采样点位置见图 2. (a) T1 阶地地质剖面及采样位置; (b) T2 阶地地质剖面、采样位置及照片; (c) T3 阶地两个采样位置的地层剖面和采样位置; (d) T4 阶地地质剖面及采样位置; (e) T5 阶地三个位置的地层剖面及采样位置; (f) T6 阶地两个地点的地层剖面及采样位置; (g) T7 阶地地质剖面、采样位置及照片

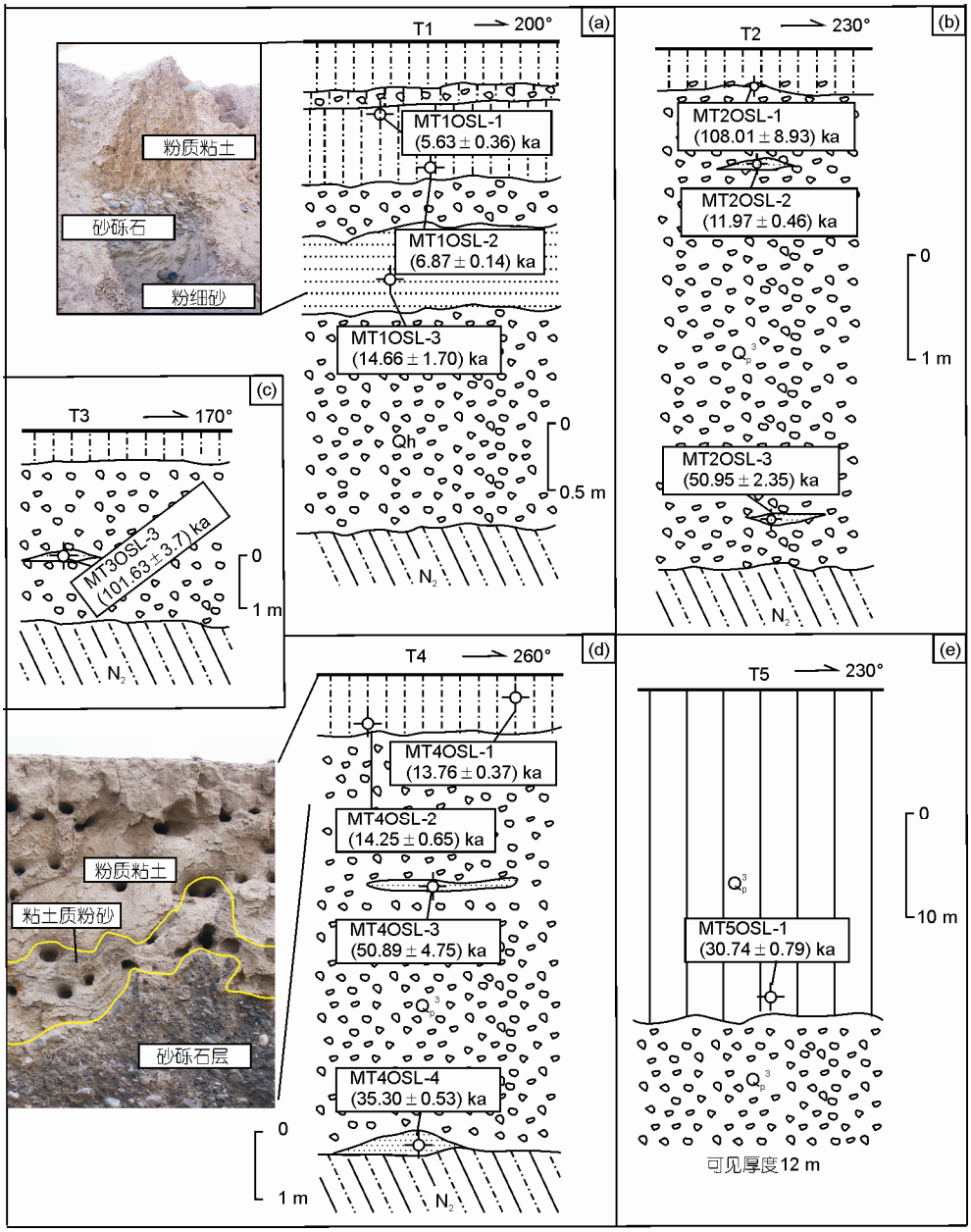


图 4　玛纳斯河阶地堆积物采样位置地层剖面

采样点位置见图 2, 图例同图 3. (a) T1 阶地地质剖面、采样位置及照片; (b) T2 阶地地质剖面及采样位置; (c) T3 阶地地层剖面和采样位置; (d) T4 阶地地质剖面、采样位置及照片; (e) T5 阶地地层剖面及采样位置

品释光信号没有“归零”, 导致同一层位中的沉积物样品光释光测年结果不一致; (3) 测年样品颗粒的大小也是影响测年结果的原因之一, 在相同的光晒退条件下, 细颗粒石英样品中较粗颗粒石英样品的释光信号容易“归零”. 以上三个因素是导致同一级阶地样品年龄测量结果出现差异的主要因素.

另外, 在奎屯河 T1 阶地粉细砂透镜体中发现一个长约 10 cm、直径 3 cm 已经碳化的树干, 地震动力学国家重点实验室测定结果为距今(1.705±0.07) ka, 树轮校正区间 252~411AD.

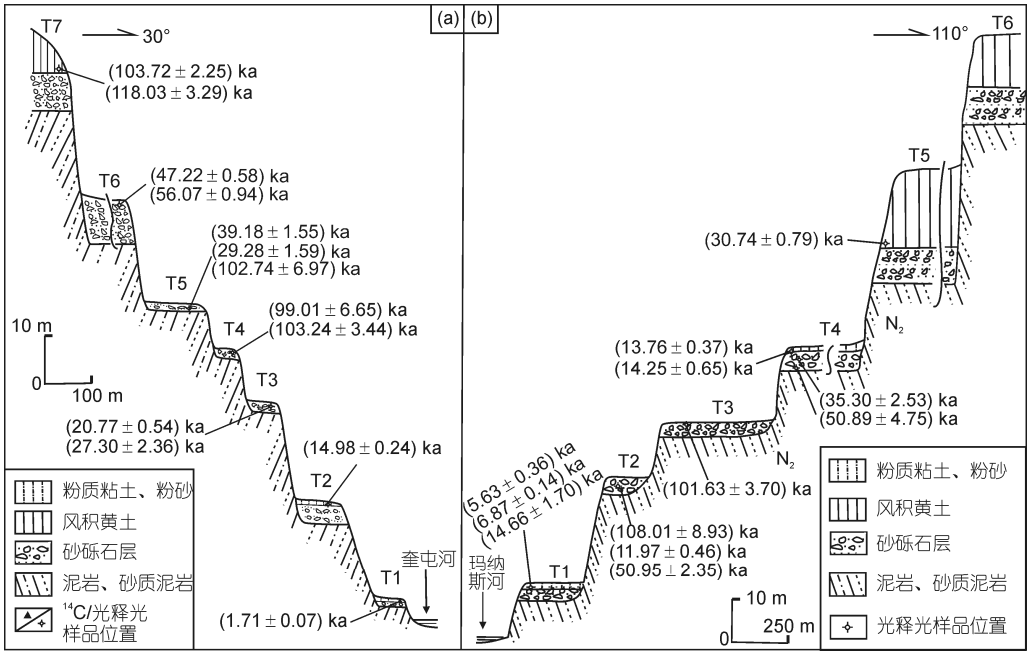


图 5　奎屯河、玛纳斯河阶地横剖面图

剖面位置见图 2. (a) 奎屯河西岸阶地剖面; (b) 玛纳斯河东岸阶地剖面

表 1　光释光样品测年结果表 [a)]

野外编号	埋深(m)	α粒子计数率(sec)	K_2O (%)	环境计量率(Gy/ka)	等效剂量(Gy)	年龄(ka)
DT2OSL-1	1.0	10.97±0.22	2.5	4.49	67.21±1.08	14.98±0.24
DT3OSL-1	2.0	13.65±0.24	2.22	4.78	99.33±2.61	20.77±0.54
DT3OSL-2	1.2	10.41±0.24	2.4	4.28	116.94±10.09	27.30±2.36
DT4OSL-1	0.8	9.51±0.23	2.4	4.1	405.77±26.88	99.01±6.56
DT4OSL-2	1.5	9.66±0.23	2.2	4.01	413.55±13.76	103.24±3.44
DT5OSL-1	2.0	8.72±0.22	2.4	3.91	402.12±27.30	102.74±6.97
DT5OSL-2	2.1	13.36±0.29	2.66	5.08	148.80±8.06	29.28±1.59
DT5OSL-3	1.0	11.22±0.25	2.4	4.46	174.64±6.91	39.18±1.55
DT6OSL-1	0.5	12.57±0.24	2.64	4.95	233.65±2.85	47.22±0.58
DT6OSL-2	1.0	9.85±0.24	2.4	4.17	234.08±3.91	56.07±0.94
DT7OSL-1	2.0	15.40±0.30	2.8	5.62	582.86±12.66	103.72±2.25
DT7OSL-2	5.0	14.50±0.29	2.4	5.05	596.03±16.59	118.03±3.29
MT1OSL-1	0.5	11.43±0.24	2.62	4.70	26.35±1.70	5.61±0.36
MT1OSL-2	1.0	13.87±0.25	2.5	5.09	34.92±0.69	6.87±0.14
MT1OSL-3	2.0	15.69±0.27	2.4	5.35	78.45±9.10	14.66±1.70
MT2OSL-1	0.4	9.17±0.23	2.06	3.77	406.67±33.61	108.01±8.93
MT2OSL-2	1.1	11.53±0.23	2.62	4.70	56.22±2.17	11.97±0.46
MT2OSL-3	4.5	10.14±0.26	2.5	4.24	216.01±9.96	50.95±2.35
MT3OSL-1	2.5	8.16±0.21	2.06	3.51	356.48±12.99	101.63±3.70
MT4OSL-1	0.5	13.92±0.28	2.3	4.97	68.33±1.83	13.76±0.37
MT4OSL-2	1.0	14.28±0.10	2.7	5.37	76.49±3.47	14.25±0.65
MT4OSL-3	3.5	8.35±0.08	2.8	4.23	215.14±20.26	50.89±4.75
MT4OSL-4	8.0	9.45±0.08	2.8	4.45	157.23±2.35	35.30±0.63
MT5OSL-1	28	15.92±0.28	2.5	5.35	164.35±4.21	30.74±0.79

a) 地震动力学国家重点实验室测试

2.3 奎屯河、玛纳斯河阶地形成的年代

影响河流阶地形成的主要原因有气候变化和构造活动. 气候变化主要表现为冰期和间冰期的交替, 在内陆地区由于冰期强烈的物理风化作用导致大量碎屑物进入河谷中, 以及河流流量的减少导致河流下切能力减弱, 使得河流的侵蚀以拓宽河谷为主; 间冰期气候温暖, 降雨量增加和地表植被丰富, 导致进入河谷的碎屑物减少, 河流的流量增大使得其下切能力增强, 河流以下切河谷为主, 冰期形成的冲洪积扇被下切而形成阶地[5,28]. 在活动构造发育的地区, 地壳相对稳定时河流以侧蚀为主, 形成河漫滩和冲洪积层; 地壳隆升阶段河流以深切为主, 使河漫滩转化为阶地. 在天山北麓穿越活动褶皱带的河流因褶皱的间歇性隆升会引起间歇式的侧向侵蚀和下切, 以及晚第四纪气候的变化引起的河流侧蚀和下切共同作用形成深切河谷和两岸的阶地地貌; 而在活动褶皱带以北的准噶尔盆地南缘, 河流仅发育因气候变化形成的区域性阶地[4].

阶地堆积物的时代大致为晚第四纪冰期、冰阶、寒冷阶段, 或活动褶皱带隆升相对缓慢的时代. 这个时期河流拓宽河谷, 冲洪积砂砾石、粉质粘土等堆积于河谷中. 河流下切时代大致为晚第四纪间冰期、间冰阶、温暖期, 以及褶皱相对隆升较快阶段. 奎屯河自南向北横穿独山子活动背斜, 在背斜以北的地区仅发育一级堆积阶地, 独山子活动背斜段发育 7 级阶地, 且为基座阶地(图 2). 玛纳斯河自南向北切穿玛纳斯活动背斜, 在背斜段形成 6 级基座阶地, 而在褶皱带以北的地区, 仅发育一级堆积阶地(图 2). 野外工作中用手持 GPS 测定阶地采样地点阶地面的海拔高度, 用 TRUPULSE$_{TM}$200 激光测量仪测定阶地砾石层的厚度, 奎屯河西岸、玛纳斯河东岸阶地横剖面如图 5 所示.

新疆和藏北地区均属于大陆内部干旱地区, 中更新世末期以来经历了多次气候的变化. 根据施雅风等[29~31]、孙建中和赵景波[32]、姚檀栋等[33~35]、刘光锈等[36]、唐领余等[37]和薛积彬等[38]等人的研究, 距今 200 ka 以来的中更新世末期以来, 新疆和藏北地区经历了 20 次气候的冷暖变化(图 6). 如前所述, 断代样品采样的位置均位于河流堆积物的上部位置, 它们的光释光测年结果应反映了冰期、冰阶、寒冷阶段河流拓宽河谷, 或构造隆升相对缓慢阶段的末期. 之后的气候转暖间冰期、间冰阶和温暖期河流流量增加, 或背斜构造快速隆升阶段, 河流切割冲洪积物和下伏的基岩而形成阶地.

从图 3, 5 和 6 中可以看出, 奎屯河 T7 阶地堆积物的测年样品采自砂砾石层之上的黄土夹砾石层中, 该层为 T7 阶地的河漫滩相沉积物, 黄土样品适合于光释光测年[39], 测年结果为距今 103~118 ka; 采样位置以上的黄土中未发现砾石和层理现象, 因此, 这个年代值应大致代表了奎屯河 T7 阶地沉积物的最后形成时代, 之后的末次间冰期奎屯河流量增大, 河流下切形成 T7 阶地, 下切的时代推测为距今 100 ka 左右. 奎屯河 T6 阶地砾石层厚约 10 m 左右, 顶部不发育河漫滩相的细颗粒沉积物, 砂砾石层中的细砂透镜体光释光测年结果为距今 47~56 ka, 推测该阶地堆积物形成于距今 58~75 ka 的末次间冰期早冰阶, 在末次间冰期间冰阶被下切, 距今约为 50 ka. T5 阶地堆积物有 3 个测年结果, 较年轻的两个年龄值为距今 29.3~39.2 ka, 为末次间冰期间冰阶的堆积物, 推测 T5 阶地的下切时代为距今约 30 ka 左右的的异常温暖阶段. 奎屯河 T3 阶地砾石层厚 3~5 m, 其上无河漫滩相的细颗粒沉积物, 砂砾石层中的粉细砂透镜体光释光测年结果为距今 20.7~27.3 ka, 应为距今 23~30 ka 之间的低温期的冲积物, 推测该级阶地下切的时代为距今约 20 ka 的末次冰盛期温暖阶段. 奎屯河 T2 阶地为典型的二元沉积结构, 下部为厚 5~6 m 的砂砾石堆积, 上部为厚约 1~1.5 m 的粉质粘土; 粉质粘土的光释光测年结果为距今 14.98 ka, 为末次冰后期寒冷阶段的沉积, 推测在距今 14 ka 开始的末次冰后期温暖阶段被下切形成 T2 阶地. T1 阶地为二元沉积结构, 下部为砂砾石堆积, 上部为细砂和粉质粘土层; 下部细砂层中夹的粘土层 ^{14}C 年龄为距今 8.4 ka[4]的全新世早期, 上部细砂透镜体中碳化的植物残体 ^{14}C 年龄为距今 1.7 ka, 应是全新世末气候干湿波动阶段的堆积, 推测 T1 阶地被下切时代为全新世末干湿气候波动阶段. 奎屯河 T4 阶地堆积物测年结果为距今 100 ka 左右, 可能是测年样品堆积之前没有充分退火的原因, 依据奎屯河阶地序列关系, 可以推测 T4 阶地下切的时代约为 25 ka.

玛纳斯活动背斜段的玛纳斯河发育 6 级基座阶地. T5 阶地砾石层之上覆盖厚约 25 m 的风积黄土, 黄土底部样品的光释光年代为距今 30.74 ka, 砾石层中未取得年代数据, 推测为末次间冰期早冰阶及其

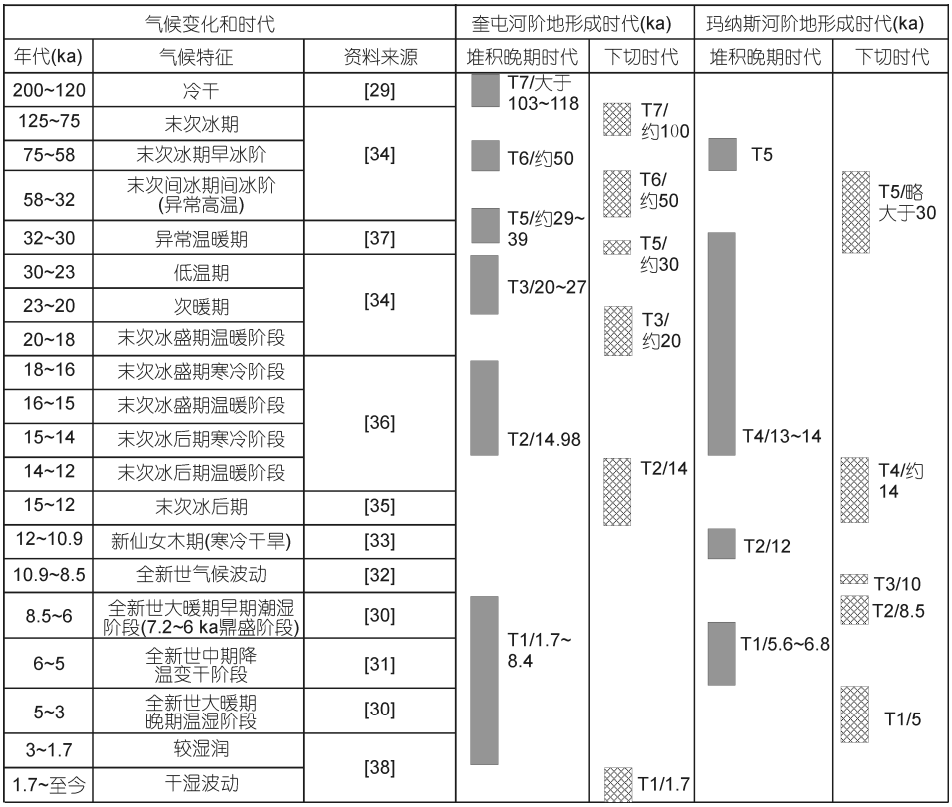


图 6　阶地堆积、下切与晚第四纪气候变化

T2/14: T2 表示 T2 阶地, 14 表示堆积或下切时代

之前的产物, 其下切时代应为黄土开始堆积的时代, 即距今 31 ka 左右. 玛纳斯河 T4 阶地堆积物为二元沉积结构, 下部为砂砾石堆积, 堆积年龄为距今 35~50 ka 左右的末次冰期冰盛期; 上部为层理明显的粘土质粉砂和粉质粘土, 还有冻融形成的地层弯曲现象(图 4(d)), 该层中两个光释光样品的测年结果为距今 13.8~14.3 ka, 为末次冰后期寒冷阶段的堆积, 推测玛纳斯河 T4 被下切的时代为末次冰后期温暖阶段(12~14 ka). 玛纳斯河 T2 阶地堆积物中得到 3 个测年结果, 其中 2 个样品颗粒偏粗, 测年结果偏老, 另外一个样品为粉砂透镜体, 距离地表面深度约 1 m, 测年结果为距今 11.97 ka, 采样位置及其以上堆积物为新仙女木期, 推测该阶地开始下切的时代为全新世大暖期早期潮湿阶段, 距今约 8.5 ka. 玛纳斯河 T1 阶地堆积物中得到了 3 个样品的测年结果, 其中 2 件样品为砾石层上部的粉质粘土, 测年结果为距今 5.6~6.9 ka, 为全新世中期降温变干阶段的堆积, 推测在全新世大暖期温湿阶段(3~5 ka)该堆积物被下切形成阶地. 玛纳斯河 T3 阶地上得到的堆积物光释光年代为距今 101.63 ka, 明显大于 T5 阶地堆积物的年龄, 显然这个测年结果不合理. 但从玛纳斯河阶地序列看, T3 阶地的堆积也可能在新仙女木期, 下切时代应全新世气候波动阶段, 距今 10 ka 左右. T6 阶地没有取得年代数据, 在此不予讨论.

3　活动褶皱段河流阶地的成因分析

河流的侧蚀和下切、阶地的发育反映了气候干燥和湿润及冰期和间冰期的变化交替[40,41]. 但是在构造隆升强烈的地区, 构造抬升使河流具有了强烈下切的潜在能力, 即河流阶地是在气候变化和构造运动双重影响下形成的[42,43].

河流地貌和沉积特征对构造运动有很敏感的响应. Maddy 等[43]研究的结果也说明隆升驱动的河流下切在英国南部河流阶地的形成过程中起了决定性的作用. 在独山子、玛纳斯活动背斜分布区的河流阶地

为基座阶地, 每级阶地上均为冲积相的砂砾石堆积. 对于气候成因阶地, 其阶地拔河高度与被下切时间的关系大致是直线型的[44], 在活动背斜段奎屯河和玛纳斯河阶地砾石层顶面的拔河高度与下切年代的关系并不具备这一特征(表 2, 图 7), 活动背斜段河流的下切应该与活动褶皱的隆升密切有关. 具体到穿越独山子活动背斜、玛纳斯活动背斜的奎屯河和玛纳斯河而言, 我们认为背斜构造晚第四纪持续的、或间歇性的隆升使河流的坡度加大, 在河流流量一定的条件下加速了河流的下切, 表现为深切的峡谷和基座阶地, 且基座出露高度远大于几米到十米左右的砂砾石堆积. 在气候湿润的间冰期、间冰阶或温暖阶段, 河流流量的增加更加强了其下切能力. 在气候干旱、寒冷的冰期、冰阶或寒冷阶段, 河流主要拓宽河谷形成宽谷阶地, 但是构造隆升使河流坡度达到一定值时, 仍然可以下切形成基座阶地.

4　独山子背斜与玛纳斯背斜晚第四纪的隆升差异

4.1　独山子背斜和玛纳斯背斜晚第四纪的隆升

从前文中可知: (1) 奎屯河 T2 阶地和玛纳斯河 T4 阶地的沉积特征一致, 均为典型的二元结构, 下部为厚 5.5~6 m 的砂砾石层, 上部厚 1~1.5 m 的漫滩相粉细砂和砂质粘土; (2) 阶地堆积物上部细粒物质的光释光测年结果表明它们的沉积时代一致, 为距今 13~15 ka 的末次冰后期寒冷-温暖阶段. 以上两点说明, 奎屯河 T2 阶地和玛纳斯河 T4 阶地的形成时代相同. 不同的是: (1) 奎屯 T2 阶地形成以来河流下切了 40 m, 玛纳斯河 T4 阶地形成以来河流下切了 95 m; (2) 奎屯河 T2 阶地以下的河谷中仅发育 1 级阶地, 而玛纳斯河 T4 阶地以下的河谷中发育 3 级阶地; (3) 距今 14 ka 以来, 奎屯河的下切速率为 2.7 mm/a, 玛纳

表 2　活动背斜段河流下切速率表

阶地编号	奎屯河						玛纳斯河					
	拔河高度 (m)	下切时代 (ka)	平均下切速率 (mm/a)	与下一级阶地高差 (m)	下切时间 (ka)	下切速率 (mm/a)	拔河高度 (m)	下切时代 (ka)	平均下切速率 (mm/a)	与下一级阶地高差 (m)	下切时间 (ka)	下切速率 (mm/a)
T7	216	100	2.2	60	50	1.2						
T6	156	50	3.1	26	18	1.6						
T5	130	32	4.1	30	7	4.3	115	32	3.6	20	17	1.2
T4	100	25	4.0	22	5	4.4	95	14	6.8	35	4	8.8
T3	78	20	3.9	38	6	6.3	60	10	6.0	30	1.5	20
T2	40	14	2.7	33	12.3	2.7	30	8.5	3.5	15	3.5	4.3
T1	7	1.7	4.1	7 (与河漫滩)	1.7	4.1	15	5	3.0	15 (与河漫滩)	5	3.0

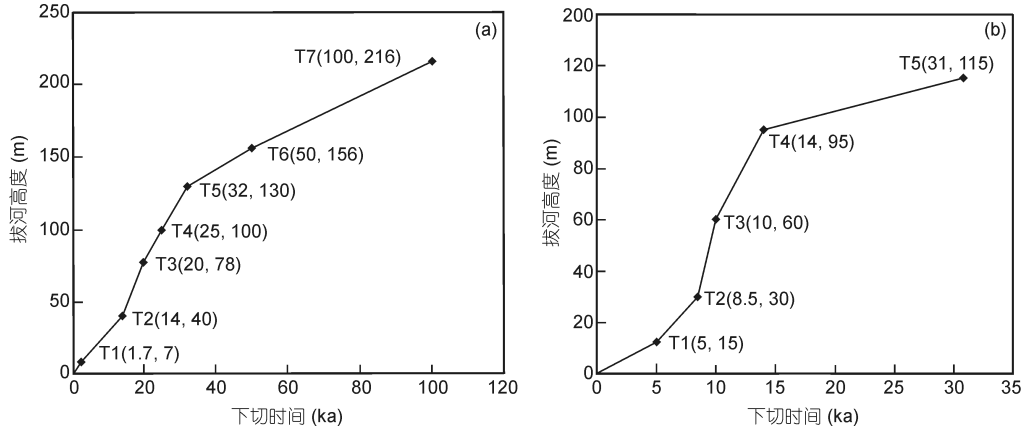


图 7　阶地拔河高度与河流下切时间图

(a) 奎屯河; (b) 玛纳斯河. T4(25,100): T4 表示阶地编号, 括号内前一个数字表示河流下切时代, 后一个数字表示阶地砾石层顶面拔河高度

斯河下切速率为 6.8 mm/a; (4) 距今 14~32 ka 之间, 奎屯河 3 次下切形成 3 级基座阶地, 玛纳斯河仅发生一次下切, 形成一级基座阶地; (5) 奎屯河 T1 阶地下切时代为距今 1.7 ka 的全新世晚期, 玛纳斯河 T1 阶地的下切时代为距今 5 ka. 两条河流 T1 阶地的下切速率分别为 4.1 和 3.0 mm/a.

河流的下切速率不能等同于活动构造的隆升速率, 因为气候因素在河流下切过程中持续的发挥作用. 在活动背斜分布区北约 5~8 km 的位置, 奎屯河、玛纳斯只发育一级堆积阶地, 且拔河高度为 5~6 m, 这个值应是天山北麓气候因素导致河流下切的极限值. 如前所述, 发育在独山子背斜区的奎屯河阶地、玛纳斯背斜区的玛纳斯河阶地与活动褶皱的隆升有密切关系, 气候因素导致的河流下切深度有限. 因此, 在独山子背斜段、玛纳斯背斜段发育的阶地与背斜的隆起密切相关, 不同阶地砾石层顶面的拔河高度大致等同于同时段活动背斜的隆升高度, 河流的下切速率约等于活动背斜的隆升速率.

4.2 独山子背斜、玛纳斯背斜晚第四纪隆升的差异性和成因分析

从上文可知, 距今 14 ka 以来独山子背斜和玛纳斯背斜的隆升量分别为 40 和 95 m, 隆升速率分别为 2.7 和 6.8 mm/a, 二者之间存在显著的差异.

北天山山前发育的逆断裂-褶皱带属于断层扩展褶皱, 在区域挤压应力作用下, 天山主体沿高角度断裂向北逆冲, 在山前地下 8~9 km 左右形成低角度滑脱断裂. 滑脱断裂首先在山前形成第一个断坡, 并形成第一排背斜带. 随着时间推移和构造变形的发展, 低角度滑脱断裂继续向准噶尔盆地内部发展, 一般在距山前 10~20 km 处形成第二个断坡并向上分叉, 同时形成第二排背斜带-玛纳斯逆断裂-背斜带,然后继续向北发展形成第三排背斜带-独山子逆断裂-背斜带[45]. 依据 1950~1992 年多期精密水准测量, 得到新疆地区垂直形变速率分布图[46]. 从该图中可以看出, 天山主体最大隆升速率达 17.8 mm/a, 石河子市以南的天山山体隆升速率是 8~10.5 mm/a. 我们的研究资料表明, 距离天山主体近的玛纳斯背斜带中的玛纳斯背斜晚更新世晚期以来隆升速率为 6.8 mm/a, 距离天山主体远的独山子背斜带中的独山子背斜晚更新世晚期以来隆升速率为 2.7 mm/a. 这一组数据可以看出, 天山山体的隆升速率是由内山体内部向山体外部逐渐减小, 反映出天山向北扩展的演化过程.

5 讨论和结论

天山北麓的玛纳斯、独山子活动逆断裂-褶皱带发育在准噶尔盆地南缘, 为天山向准噶尔盆地挤压逆冲在沉积盖层中形成的新生代褶皱带, 晚第四纪以来它们仍然在持续活动. 横切独山子活动背斜的奎屯河发育 7 级基座阶地, 横切玛纳斯活动背斜的玛纳斯河发育 6 级基座阶地, 它们的形成与晚第四纪时期独山子背斜、玛纳斯背斜的褶皱隆升有关. 距今 14 ka 以来, 玛纳斯背斜发生了 4 次强烈的褶皱隆升, 而独山子背斜仅发生了 2 次隆升. 独山子背斜最新一次褶皱隆升事件发生在距今 1.7 ka, 玛纳斯背斜最新一次褶皱隆升发生在距今 5 ka. 距今 14 ka 以来的晚更新世晚期以来, 玛纳斯背斜、独山子背斜的隆升量分别为 40 和 95 m, 隆升速率分别为 2.7 和 6.8 mm/a. 距今 14~32 ka 的晚更新世晚期, 独山子背斜发生了三次褶皱隆升, 而玛纳斯背斜发生了一次褶皱隆升.

玛纳斯活动逆断裂-褶皱带上晚更新世晚期以来发现的古地震事件与玛纳斯河流阶地的形成时代对比, 可以发现: (1) 玛纳斯河 T4 阶地形成于距今 14 ka 左右的温暖时期, 同时在天山北麓的玛纳斯活动逆断裂带内发生了古地震(丛集)的事件, 发生的时代为距今约 15 ka 左右[47]. 推测古地震的集中发生使得玛纳斯活动背斜加速隆起, 从而加剧了河流的下切. (2) 在距今 5~6 ka 间, 玛纳斯活动逆断裂-褶皱带上又记录到一丛古地震(丛集)事件, 古地震崩积楔的高度为 0.6~1.1 m 不等, 这丛古地震事件的发生可能导致了玛纳斯河 T1 阶地堆积物(堆积年代为距今 5~6 ka)的快速下切, 最终形成现今玛纳斯河 T1 阶地. T1 阶地拔河高度 15 m, 它应当也包含了 1906 年玛纳斯 7.7 级地震形成的褶皱隆起[21], 但 1960 年前后沿玛纳斯河修建了水利工程, 改变了玛纳斯河的水动力环境, 没有形成新的河流阶地. (3) 玛纳斯河 T1 和 T4 阶地之间还发育 2 级阶地, 它们也可能反映了玛纳斯背斜的 2 次快速隆起, 也可能伴随 2 次古地震事件集中发生, 但这 2 期事件在玛纳斯河断裂上没有发现, 它们可能是 2 次地震断层没有出露地表的褶皱古地震事件.

距今 20 ka 以来独山子-安集海断裂带的古地震

活动在时间上是不均一, 距今 8 ka 年以前只发生过 2 次古地震事件, 重复间隔是 4~5 ka, 距今 3~8 ka 之间发生过 4 次古地震事件, 重复间隔是 1.5 ka. 即该断裂带上的古地震重复周期在平静期大约是 4~5 ka, 活跃期是 1.5 ka, 最近一次古地震事件发生在距今 2 ka 左右[47]. 对比奎屯河独山子活动背斜段阶地的形成时代, 可以发现最近一次古地震事件(距今 2 ka)以来, 奎屯河下切了 7 m, 据 T1 阶地堆积物距离地表 0.6 m 深处的 ^{14}C 年代样品测年结果为距今 1.7 ka 左右, 推测这次古地震事件造成独山子背斜的强烈隆起而导致河流下切. 奎屯河 T2 阶地顶部河漫滩相堆积物底部的堆积时代为距今 15 ka 年左右, 该堆积物与玛纳斯河 T4 阶地顶部的河漫滩型堆积物相似, 估计其下切时代为距今 14 ka. 独山子活动逆断裂-背斜带距今 12.8 ka 左右发生过古地震(丛)事件, 它可能造成独山子背斜瞬间的快速隆起, 而导致奎屯河的快速下切; 距今 3~8 ka 之间, 独山子-安集海断裂带还记录到 4 次古地震事件, 但在独山子背斜段奎屯河没有发育河流阶地, 推测这期间独山子逆断裂-褶皱带发生强烈地震, 造成独山子背斜以平均 2.7 mm/a 的速率快速隆起, 在奎屯河独山子背斜段形成现今峡谷地貌.

致谢 本论文完成过程中, 张培震、徐锡伟和尹功明研究员给予了有益的建议, 两位审稿人提出了建设性的修改意见, 在此深表谢意.

参考文献

1 Minster J B, Brown E T. Present-day plate motions. J Geophys R, 1978, 83: 5331–5354
2 Avouac J P, Tapponier P, Bai M, et al. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. J Geophys Res, 1993, 98: 6755–6804
3 郭召杰, 张志成, 吴朝东, 等. 中新生代天山隆起过程及其与准噶尔、阿尔泰山比较研究. 地质学报, 2006, 80: 1–15
4 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等. 天山活动构造. 北京: 地震出版社, 2000. 266–301
5 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 Tian Shan, China. J Geol, 1994, 102: 502–583
6 杨晓平, 邓起东, 张培震, 等. 利用阶地变形资料研究北天山吐谷鲁逆断裂一背斜带晚更新世以来的褶皱变形特征. 见: 活动断裂研究编委会, 编. 活动断裂研究(4). 北京: 地震出版社, 1995. 46–62
7 杨晓平, 陈立春, 李安, 等. 西南天山阿图什背斜晚第四纪的阶段性隆升. 地学前缘, 2009, 16: 160–170
8 程绍平, 邓起东, 闵伟, 等. 黄河晋陕峡谷河流阶地和鄂尔多斯高原第四纪构造运动. 第四纪研究, 1998, 3: 238–248
9 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
10 Li Y L, Yang J C, Tan L H, et a1. Impact of tectonics on alluvial landforms in the Hexi Corridor, Northwest China. Geomorphology, 1999, 28: 299–308
11 郑文涛, 杨景春, 段锋军. 武威盆地晚更新世河流阶地变形与新构造活动. 地震地质, 2000, 22: 318–328
12 Lave J, Avouac J P. Active folding of fluvial terraces across the Siwaliks Hill, Himalayas of central Nepal. J Geophys Res, 2000, 105: 5735–5700
13 沈军, 赵瑞斌, 李军, 等. 塔里木盆地西北缘河流阶地变形测量与地壳缩短速率. 科学通报, 2001, 46: 334–338
14 袁庆东, 郭召杰, 张志城, 等. 天山北缘河流阶地形成及构造变形定量研究. 地质学报, 2006, 80: 210–216
15 杨晓平, 冉勇康, 程建武, 等. 柯坪推覆构造中的几个新生褶皱带阶地变形测量与地壳缩短. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 905–913
16 史兴民, 李有利, 杨景春, 等. 新疆玛纳斯河山前地貌对构造活动的响应. 地质学报, 2008, 82: 281–288
17 吕红华, 李有利, 南峰, 等. 天山北麓河流阶地序列及形成年代. 地理学报, 2008, 63: 65–74
18 Merri L, Formento T, Douglas W, et a1. River response to an active fold and thrust belt in a convergent margin setting, North Island, New Zealand. Geomorphology, 2002, 49: 125–152
19 张培震, 邓起东, 杨晓平, 等. 天山北麓的冰水冲洪积地貌与新构造运动. 见: 活动断裂研究编委会, 编. 活动断裂研究(4). 北京: 地震出版社, 1995. 63–78
20 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: 584–587
21 张培震, 邓起东, 徐锡伟, 等. 盲断裂、褶皱地震与新疆 1906 年玛纳斯地震. 地震地质, 1994, 16: 193–204
22 孙洪艳, 李志祥, 田明中, 等. 第四纪测年研究新进展. 地质力学学报, 2003, 9: 371–378
23 王昌盛, 陈杰, 张克旗. 西南天山明尧勒背斜河流阶地沉积物的光释光测年. 地震地质, 2005, 27: 586–598

24 Lu Y C, Wang X L, Wintle A G. A new chronology for dust accumulation in the last 130,000 yr for the Chinese Loess Plateau. Quat Res, 2007, 67: 152–160

25 王旭龙, 卢演俦, 李晓妮. 细颗粒石英光释光测年: 简单多片再生法. 地震地质, 2005, 27: 613–623

26 Martinson D G, Pisias N G, Hays J D, el a1. Age dating and the orbital theory of the ice age: development of a high-resolution 0 to 300,000 year chronostratigraphy. Quat Res, 1987, 27: 1–29

27 卢演俦, 尹功明, 陈杰,等. 第四纪沉积物的光释光测年. 地球科学——中国地质大学学报. 1995, 20: 668–668

28 Bull W B. Stream-terrace genesis: Implications for soil development. Geomorphology, 1990, 3: 351–367

29 施雅风, 文启忠, 曲耀光. 新疆柴窝堡盆地第四纪气候环境变迁和水文地质条件. 北京: 海洋出版社, 1990

30 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. 中国科学 B 辑, 1992, 22: 1300–1308

31 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期鼎盛阶段的气候与环境. 中国科学 B 辑: 1993, 23: 865–872

32 孙建中, 赵景波. 黄土高原第四纪. 北京: 科学出版社, 1991

33 姚檀栋, 焦克勤, 杨志红, 等. 古里雅冰芯中的小冰期气候记录.中国科学 B 辑, 1995, 25: 1108–1114

34 姚檀栋, 施雅风, 秦大河, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1997, 27: 447–452

35 姚檀栋. 末次冰期青藏高原的气候变化记录-古里雅冰芯与格陵兰 GRIP 冰芯对比研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1999, 29: 175–184

36 刘光锈, 沈永平, 王睿, 等. 孢粉记录揭示的 2 万年以来若尔盖地区的气候变化. 冰川冻土, 1995, 17: 132–137

37 唐领余, 沈才明, 孔昭宸, 等. 青藏高原末次冰期最盛期气候的花粉证据. 冰川冻土, 1998, 20: 133–140

38 薛积彬, 钟巍, 赵引娟, 等. 东疆北部全新世气候不稳定性的湖泊沉积记录. 中国沙漠, 2008, 28: 648–656

39 Watanuki T, Murray A S, Tsukamoto S. A comparison of OSL ages derived from silt-sized quartz and polymineral grains from Chinese loess. Quat Sci Rev, 2003, 22: 991–997

40 Chatters J C, Hoover K A. Response of the Columbia river fluvial system to Holocene climatic change. Quat Res, 1992, 37: 42–59

41 Martin C W. The response of fluvial systems to climate change: An example from the central Great Plains. Phys Geogr, 1992, 13: 101–114

42 Bridgland D R. River terrace systems in north-west Europe: An archive of environmental change, uplift and early human occupation. Quat Sci Rev, 2000, 19: 1293–1303

43 Maddy D, Bridgland D, Westaway R. Uplift-driven valley incision and climate-controlled river terrace development in the Thames Valley. Quat Int, 2001, 79: 23–36

44 Pan B, Burbank D, Wang Y, et al. A 900 k.y. record of strath terrace formation during glacial-interglacial transitions in northwest China. Geology, 2003, 31: 957–960

45 张培震, 邓起东, 杨晓平, 等. 天山的晚新生代构造变形及其地球动力学问题. 中国地震, 1996, 12: 127–140

46 彭树森. 大地形变测量所反映的天山新构造运动. 内陆地震, 1993, 7: 136–141

47 毛凤英, 张培震. 古地震研究逐次限定方法与新疆北部主要断裂带的古地震研究. 见: 活动断裂研究编委会, 编. 活动断裂研究(4). 北京: 地震出版社, 1995. 153–164