

昆仑山北坡鸭子泉河阶地发育及其构造-气候意义

常宏 张培震 安芷生 王旭龙 强小科 符超峰

(中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075; 中国科学院研究生院, 北京 100039; 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029. E-mail: changhong6666@x263.net)

摘要 昆仑山北坡鸭子泉河流阶地系列是晚更新世以来青藏高原阶段性隆升的地貌标志。阶地地貌及沉积学研究证明其为构造成因阶地, 是青藏高原北部构造隆升过程中河流阶段性下切作用形成的。通过粗颗粒石英(90~125 μm)的光释光单片再生法(SAR)及 ^{14}C 测年研究, 初步确定鸭子泉河各级阶地的形成年代分别约为 57.5, 12.8 和 6.5 ka BP。三级阶地特征及年代学研究揭示昆仑山北坡在全新世初期河流下切速率明显提高, 从 12.8 ka BP 开始下切速率平均值由 $0.43 \pm 0.08 \text{ mm/a}$ 突变为 $1.59 \pm 0.69 \text{ mm/a}$, 显然, 全新世之初昆仑山开始较为强烈地隆升。青藏高原北部边界的阿尔金断裂构造运动也存在本次变化, 但其隆升速率明显大于昆仑山, 这种差异表明青藏高原北部边缘的地表隆升和地壳增厚有大于其内部的趋势。

关键词 青藏高原 昆仑山 阶地 光释光 构造隆升

当代地球科学研究的一个重要问题就是陆内变形及其与板块构造的关系^[1]。GPS观测结果表明印度与欧亚板块之间相对运动量的绝大部分被青藏高原的现今地壳缩短速率所吸收和调节; 但是, 什么样的构造作用实现了这种吸收和调节还存在着较大的争论。一种观点认为大陆岩石圈块体在青藏高原内部沿古老缝合带斜向陆内俯冲的复活吸收了地壳缩短, 导致了高原的地壳增厚、高原面隆升、巨型走滑断裂形成和块体的向东挤出^[2]。另外一种观点认为, 青藏高原内部的地壳增厚和地表隆升在大约 8~14 Ma BP 时已经停止, 构造变形以近东西向拉张和共轭剪切为主要特征, 地壳增厚和地表隆升只发生在高原的周边地区^[3~7]。

青藏高原周边的构造热年代学研究揭示了周边隆起的起始年代确实很晚, 如东缘的横断山脉的隆起发生在 7~13 Ma BP^[8], 龙门山和岷山隆起时代是 5~12 Ma BP^[9], 北缘六盘山-拉脊山的隆起可能发生在大约 8 Ma BP^[10], 阿尔金山(当金山口一带)的隆起时间是 8~10 Ma BP^[11]。

上述研究并没有指出高原周边晚第四纪以来是否仍然发生隆升。本文试图通过对昆仑山北坡的鸭子泉河流阶地下切历史的研究, 探讨青藏高原北缘是否存在晚第四纪的构造隆升事件。鸭子泉河位于昆仑山北坡, 是一条常年性河流, 其源头为昆仑山北部的祁漫塔格山下洪积扇边缘的上升泉(图 1)。祁漫塔格山常年冰雪覆盖, 冰雪融水及降雨补给给了鸭子

泉河, 使其常年流水。鸭子泉河汇入托格拉萨依河, 最终流入戈壁滩消失, 为内流河。这种尺度和类型的河流演化可能更多地受小区域地貌、环境、气候和构造的控制^[12,13], 很可能反映了昆仑山和阿尔金山晚第四纪地质环境演化的历史。

1 阶地特征

昆仑山北坡的鸭子泉河有三级阶地, 在河流的大部分地区均有 2~3 个台阶状层状地貌。通过阶地的沉积学、地貌学及年代学的分析, 可以推断阶地成因, 并探讨构造运动与气候变化在阶地形成过程中的作用。

1.1 地貌特征

野外考察发现, 鸭子泉河具有多级阶地, 共 3 级(图 2), 出山口则变为洪积扇。山口处没有明显的新构造断裂活动的迹象。

三级阶地皆为基座阶地, 基座为第三系褐红色含砾砂岩, 产状为 $80^\circ/\text{NE } 38^\circ$, 半固结状; 三级阶地的沉积结构基本相似: 阶地下部为棱角状砾石, 成分混杂, 主要为小流域的岩浆岩及变质岩, 上部为 0.5 m 左右的粉砂层, 夹有含砾砂岩层。阶地由一级到三级砾石的固结程度逐渐变高, 三级阶地的拔河高度分别为 15, 25 和 44 m, 一级阶地与河漫滩及相邻阶地之间的高差分别为 15, 10 和 19 m。

1.2 阶地年代学

对各级阶地分别采样进行释光年代学研究。样

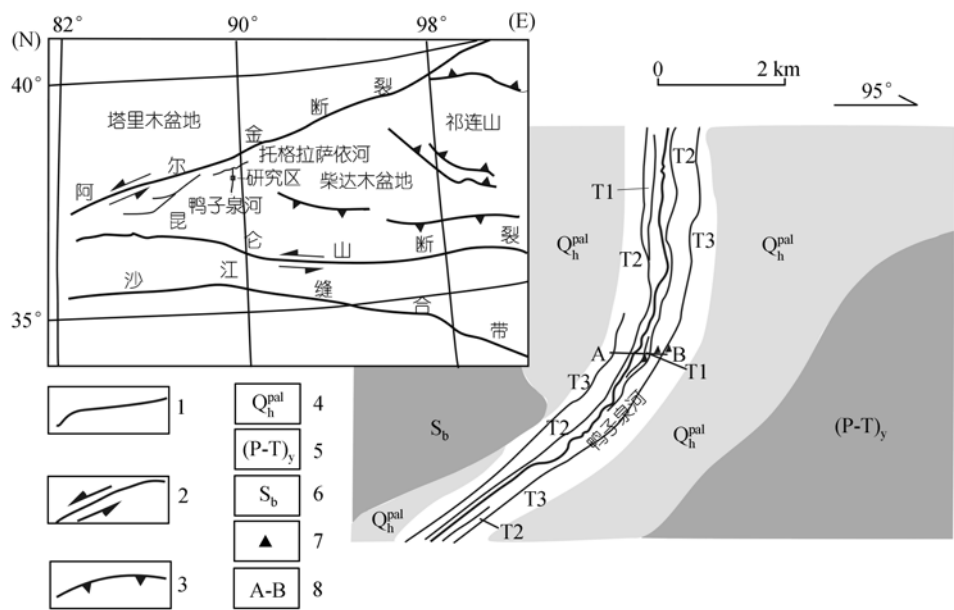


图 1 区域地质构造图

1. 缝合带; 2. 走滑断裂; 3. 逆冲断裂; 4. 全新世冲洪积; 5. 构造混杂岩带; 6. 志留系白干湖组; 7. 采样点; 8. 剖面位置

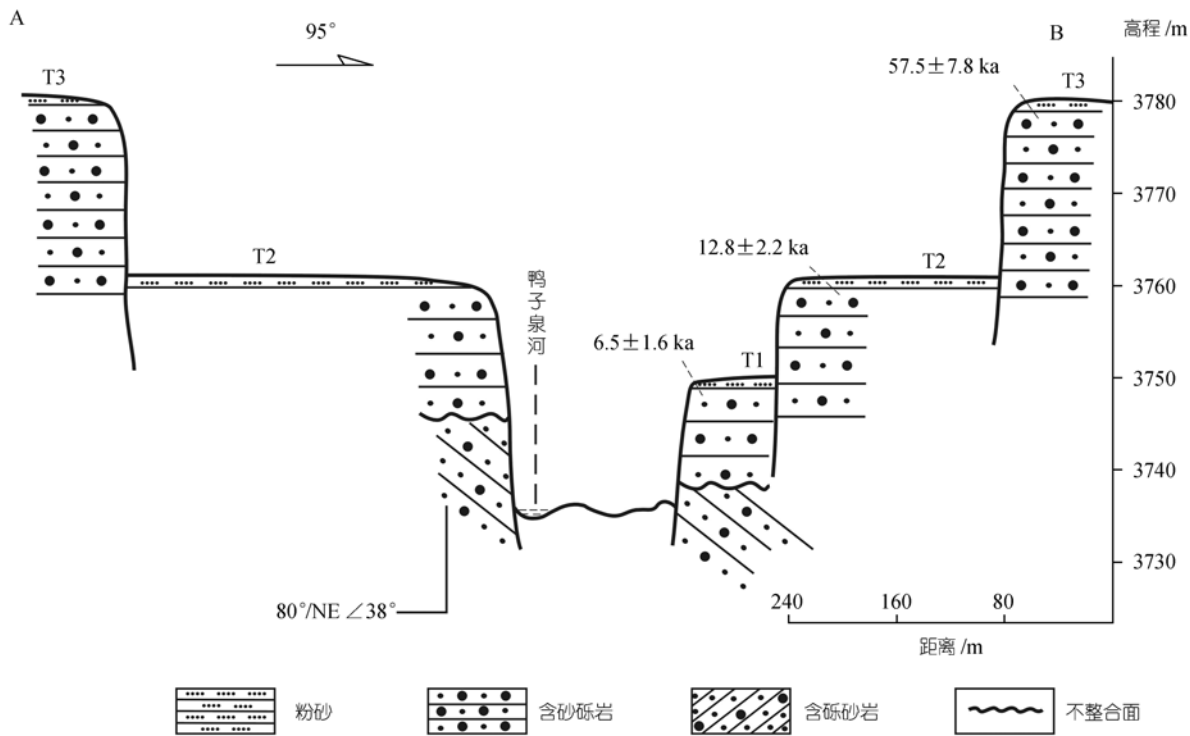


图 2 鸭子泉河流阶地剖面图

品采集于地表 50 cm 之下, 其成分为含砂砾石. 样品夜间采集, 采集后立即包装并多层封装, 保持样品组成不变. 样品前处理的过程如下: 1) 烘干样品, 后加入 HCl, H₂O₂ 去除碳酸盐和有机物; 2) 筛出 90~125 μm 粒径的颗粒; 3) 用 HF 腐蚀 30 min, 去除长石和石英受 α 辐照的外表面, 加入 HCl 浸泡 12 h 后, 烘干; 4) 再次筛出大于 90 μm 粒径的颗粒; 5) 用多钨硅酸钠重液分离出其中的石英, 用红外信号来判断; 6) 用硅胶将尽量少的样品颗粒粘在钢片上(目的是尽量可能真实地获得关于晒退的信息, 而且是在保证释光信号量的前提下进行的). 测试在中国科学院地球环境研究所释光测年研究室完成. 基于 SAR 方法对河流沉积物更有效, 能有效地测量各个样片的等效剂量, 并能通过等效剂量的分布状态来判断河流沉积物的晒退状态^[14~17], 从而尽量地确定真实的沉积年龄, 年代学研究采用粗颗粒(90~125 μm)石英 SAR 方法. 预

热温度 260 ℃, 持续时间 10 s, 释光信号测量 40 s, 样品温度为 125 ℃. 释光测量是在 Daybreak 1150 TL/OSL 测量系统上进行, 光电倍增管为 EMI 9635Q, 激发光源蓝光二极管(488 ± 10 nm), 滤光片为 U-340, 测量软件为 TLAPPLIC 4.30, 辐照源为 ⁹⁰Sr-⁹⁰γ (辐照剂量率为 0.1964 Gy/s). 每个样品都测量十几个样片, 最终样品的等效剂量的确定是通过分析等效剂量的分布情况来确定的(并参考光释光的发光曲线), 去除了其中晒退不完全样片的表面等效剂量^[14,18]. 测年数据及结果见表 1 和图 3. D95-1, D95-2 和 D95-3 样品的回授值分别为 5.7% ± 0.9%, 7.1% ± 0.6% 和 3.9% ± 0.6%. 实验获得三级阶地堆积结束的年代分别为 57.5 ± 7.8, 12.8 ± 2.2 和 6.5 ± 1.6 ka BP. 因堆积的最后时间就是河流开始下切的时间, 所以堆积结束年龄可以看作是下一级阶地开始形成的时间.

对所采河床砂及含砾砂样品进行 ¹⁴C 测年研究,

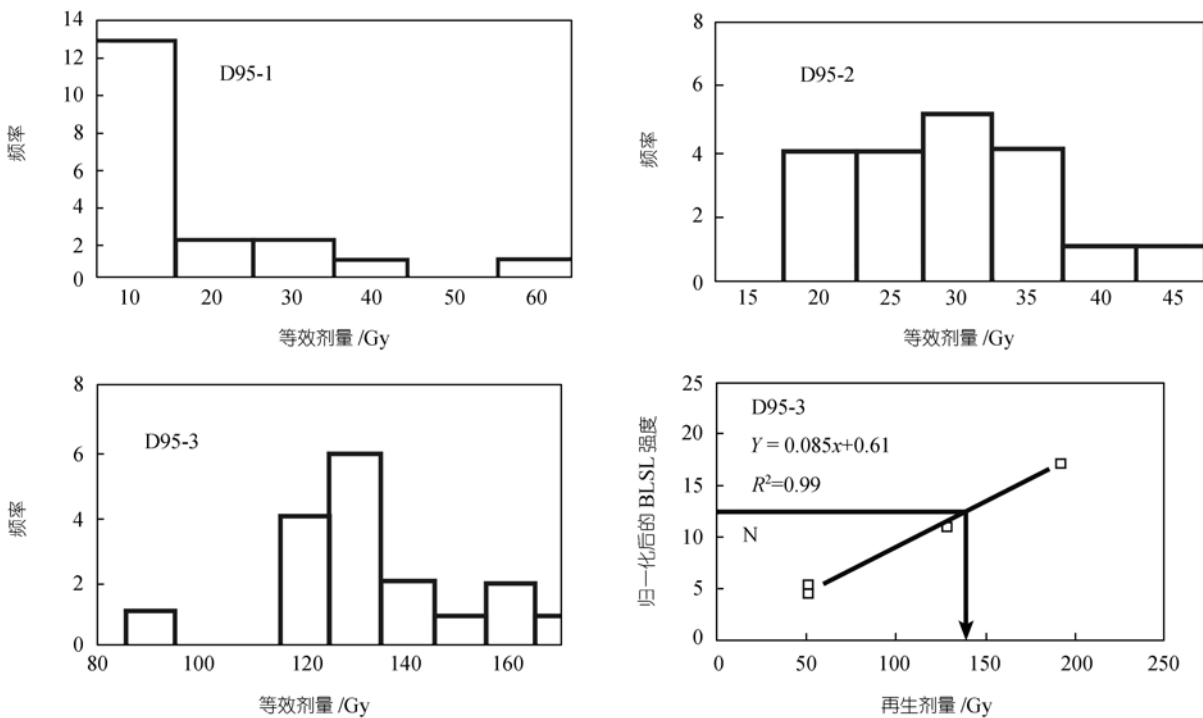


图 3 等效剂量图及单片样品剂量响应关系图

表 1 样品测定及计算参数值

样品号	含水量/%	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	K/%	剂量率/Gy · a ⁻¹	测量样片数	等效剂量/Gy	年龄/ ka
D95-OSL1	20±5	2.54	10.95	1.70	2401±185	14	15.7±3.7	6.5±1.6
D95-OSL2	20±5	1.74	7.22	2.53	2518±189	19	32.3±4.9	12.8±2.2
D95-OSL3	20±5	1.37	7.26	2.56	2461±184	17	141.4±16.0	57.5±7.8

样品处理及测试在中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室完成. 因 D95-2 和 D95-3 有机物含量太低, 无法进行年龄测定. 无机碳和富里酸对样品年龄会有很大影响^[19,20], 所以 D95-1 样品用 10% 的 HCl 浸泡, 在 70 °C 下保持 1 h, 冷却过夜, 除去这些成分. 最后洗涤至中性, 60 °C 烘干, 样品中剩余的主要有机成分为胡敏酸和胡敏素. 由于光释光得出的是日历年龄, 样品的 ^{14}C 年龄必须进行校正, 才可与其进行对比^[20,21]. 校正采用 Calib4.3^[22], 测量及校正正值如表 2. 一级阶地的年龄为 6.49 Cal ka BP.

表 2 ^{14}C 年龄及校正数据表

样品号	岩性	$\delta^{14}\text{C}$ /‰	^{14}C 年龄 /ka	校正年龄(1 σ)/ ka Cal BP
D95-1	河沙	50.955±0.831	5.7±0.136	6.662 (6.485, 6.455, 6.453) 6.312

需要说明的是, 河流相含砂砾石的光释光测年技术目前尚处于探索研究阶段, 但我们所获得的一级阶地校正 ^{14}C 年龄与光释光年龄有惊人的相似性. 说明本次采用的粗颗粒石英 SAR 方法比较适于本套样品的测量, SAR 方法可能是对河流阶地粗颗粒堆积物一种较为有效的测年方法. 本次工作年代学研究得出三级阶地的年龄分别为 57.5 ± 7.8 , 12.8 ± 2.2 和 6.5 ± 1.6 ka BP.

2 阶地成因

河流的侧蚀和下切、阶地的发育实际上分别反映了气候干燥和湿润及冰期和间冰期的变化交替^[13,23,24]. 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^[23], 只是在冰期时由于负载的增加, 这种下切的潜能没有完全释放出来或根本没有释放, 河流以侧蚀拓宽河谷为主, 从而堆积了砾石层; 当间冰期到来时, 气候变暖, 雨量充沛, 植被茂盛, 水量的增大和负载的减少使得构造抬升造成的河流下切潜能充分释放出来, 使冰期形成的宽阔河漫滩高出洪水水位以上而成为阶地. 也就是说, 河流阶地就是在气候变化和构造运动的双重影响下形成的^[12,25].

区分构造成因和气候成因阶地是一件非常困难的事情. 虽然有的研究给出了不同成因阶地的一些特点^[26,27], 但总的来说不确定的因素很多, 并且在实际应用时存在很多问题. 但根据野外观测结果还是

有可能对气候变化和构造运动在阶地形成过程中的相对重要性进行一些探讨.

根据中欧地区河流阶地的研究, Starkel^[27]提出了识别气候变化成因阶地的一些标志. 例如, 各级阶地之间的高差应该较小; 砾石层属加积类型, 一般具有多个二元结构; 沉积砾石中多见坡积物与砾石层交错互层; 阶地的底部经常是倾斜的, 等等. 野外研究表明鸭子泉沟河流阶地不具备这些特点. 河流的源头是山前洪积扇前缘上升泉, 靠祁漫塔格山冰雪融水和很少量的降水补给, 也没有很大的坡降, 所以河流的切割能力很弱. 而且昆仑山区昼夜温差大, 物理风化强烈, 河流携带物质较多, 动力作用不是很强^[28]. 河流阶地堆积物中也没有气候成因的沉积特征.

河流地貌和沉积特征对构造运动有很敏感的响应^[29~31]. 早在 1959 年, Melton^[32]就估计 25%~75% 无冰川地区的河流是受构造作用影响或控制的. Maddy^[33]研究的结果也说明隆升驱动的河流下切在英国南部阶地的形成过程中起了决定性的作用. 鸭子泉沟河流阶地为基座阶地, 每级阶地仅有一个二元结构. 对于气候成因阶地, 其拔河高度与时间的关系基本是直线型的^[34], 显然, 鸭子泉河流阶地拔河高度与沉积年代的关系并不具备这一特征. 鸭子泉河各级阶地的拔河高度分别为 15, 25 和 44 m. 较短时间段有如此大的河流下切应该是与构造隆升有关系.

综上所述, 河流下切是河流能量、坡度发生变化的一种调整. 鸭子泉河流阶地不具备气候成因阶地或者基准面升降成因阶地的特点, 从其阶地类型、纵剖面变化、沉积特征及区域地质特征分析, 阶地形成过程中虽然有气候因素的参与, 但主要是构造因素控制了阶地的形成与发展过程. 它们是昆仑山隆升、河流下切过程的直接产物, 所以对研究昆仑山隆升至关重要.

3 讨论

鸭子泉河流阶地的特征表明构造隆升在阶地形成过程中可能发挥了主要作用, 但更重要的可能是, 这三级阶地的拔河高度和形成年代揭示了河流全新世的加剧下切作用. 从三级阶地(57.5 ± 7.8 ka)到二级阶地(12.8 ± 2.2 ka)的形成经历了 44.7 ± 8.1 ka 的时间, 其下切速率为 0.43 ± 0.08 mm/a. 二级阶地到一级阶地的下切速率是 1.59 ± 0.69 mm/a, 而从一级阶地形成到现在的下切速率是 2.31 ± 0.57 mm/a. 这表明从

大约全新世以来鸭子泉河发生了强烈的下切作用。

导致加剧下切的原因是什么?一种是气候变化。气候变化导致的下切加剧应该在更大的区域上是准同步的,但从研究比较深入的祁连山东部的沙沟河剖面来看,其下切速率为 0.14 mm/a ^[34],没有出现下切加剧现象。兰州一带的黄河阶地在大约 120 ka BP 以来出现了下切加剧^[35],但其下切速率只是从原来的约 0.1 mm/a 增加到约 0.75 mm/a ,远小于鸭子泉河约 2.31 mm/a 的下切速率。另一种是构造隆升。由于昆仑山的隆升导致侵蚀基准的变化,从而引起了河流的下切加剧,这种加速是局部的,只发生在隆升地区。结合前面对鸭子泉河阶地构造成因的分析,很可能是昆仑山全新世构造隆升的加速导致了其山前河流下切的加剧。附近的阿尔金断裂也存在本期构造运动变化^[36]。

显然,河流的下切速率不等于构造隆升的速率,因为气候在河流下切过程中一直发挥着作用。如果取鸭子泉河三级阶地到目前为止的平均下切速率为气候变化导致的下切速率,其最大值约 0.77 mm/a ,从二级阶地形成以来的下切速率中减去长期平均下切速率,所获得的就是加速下切的速率,其意义可能代表着构造成因下切的最小值,也就是全新世以来构造隆升导致的下切速率至少为约 1.18 mm/a 。

1954~1979年间的大地水准测量表明^[37],在阿尔金断裂以北,阿尔金山相对于塔里木盆地的垂直抬升速率大约为 $3 \pm 1.5 \text{ mm/a}$;阿尔金断裂以南,祁漫塔格山相对于柴达木盆地的隆升速率大约为 1 mm/a 。所以,与祁漫塔格山相邻的昆仑山北坡的构造隆升速率可能也在 1 mm/a 左右,与鸭子泉河的全新世下切速率大体相当。

上述对鸭子泉河流阶地形成的研究,似乎与前人^[37]关于青藏高原边缘的地表隆升和地壳增厚大于其内部趋势的认识一致。从整个青藏高原来看,其内部的活动断裂以南北向正断层和共轭走滑断层为主^[6],内部的震源机制解表明地震均为正断层和走滑断层型地震^[3],GPS测量证明内部的东西向拉张分量大于南北向挤压^[38,39],而活动逆冲断裂、逆冲断裂型地震和GPS观测到的地壳增厚只发生在高原的周边地区。昆仑山到阿尔金山一带构造隆升速率的研究支持上述构造变形的图像。

致谢 参加野外工作的王有根宝、王向利和黎墩朋高级工程师,卢演侑研究员提出了有益的意见,在此致以谢意。本工作

受国家重点基础研究发展规划项目(编号:2004CB720200),国家自然科学基金项目(批准号:40402016,40202005)和中国科学院研究生科学与社会实践资助专项(人教字[2002]118号)资助。

参 考 文 献

- 1 Zhang P Z, Burchfiel B C, Molnar P, et al. Amount and style of later Cenozoic deformation in the Liupan Shan area, China. *Tectonics*, 1991, 10: 1111~1129
- 2 Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large scale continental tectonics. *Nature*, 1976, 264: 319~324
- 3 Molnar P, Lyon-Caen H. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the northern and eastern parts of the Tibetan Plateau. *Geophysical Journal International*, 1989, 99: 123~153
- 4 Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet. *Science*, 1992, 255: 1663~1670
- 5 Molnar P, England P, Joseph M. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(4): 357~396[DOI]
- 6 Taylor M, Yin A, Ryerson F J, et al. Conjugate strike-slip faulting along the Bangong-Nujiang suture zone accommodates coeval east-west extension and north-south shortening in the interior of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 2003, 22: 1044
- 7 张培震, 王敏, 甘卫军, 等. GPS观测的活动断裂滑动速率及其对现今大陆动力作用的制约. *地学前缘*, 2003, 10(增刊): 81~92
- 8 Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics*, 2003, 23: doi:10.1029/2002TC001402[DOI]
- 9 Kirby E, Reiners P W, Krol M A, et al. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He thermochronology. *Tectonics*, 2002, 21: doi:10.0129/2000TC001246[DOI]
- 10 郑德文, 张培震, 万景林, 等. 青藏高原东北边缘晚新生代构造变形的时序——临夏盆地碎屑颗粒磷灰石裂变径迹记录. *中国科学, D辑*, 2003, 33(增刊): 190~198[摘要] [PDF]
- 11 万景林, 王瑜, 李齐, 等. 阿尔金山北段晚新生代山体抬升的裂变径迹证据. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20: 222~224
- 12 Maddy D, Bridgland D, Westaway R. Uplift-driven valley incision and climate-controlled river terrace development in the Thames Valley, UK. *Quaternary International*, 2001, 79: 23~36[DOI]
- 13 Chatters J C, Hoover K A. Response of the Columbia river fluvial system to Holocene climatic change. *Quaternary Research*, 1992, 37: 42~59
- 14 Olley J M, Caitcheon G, Murray A S. The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz: Implication for dating young sediments. *Quaternary Science Reviews*, 1998, 17: 1033~1040[DOI]

- 15 Olley J M, Caitcheon G, Roberts R G. The origin of dose distributions in fluvial sediments, and the prospect of dating single grains from fluvial deposits using optically stimulated luminescence. *Radiation Measurements*, 1999, 30: 207~217[DOI]
- 16 Kenneth L, McKeever S W S. Equivalent dose distribution analysis of Holocene eolian and fluvial quartz sands from Central Oklahoma. *Radiation Measurements*, 2000, 32: 603~608[DOI]
- 17 Wallinga J. On the detection of OSL age overestimation using single-aliquot techniques. *Geochronometria*, 2002, 21: 17~26
- 18 Murray A S, Roberts R G. Measurement of the ED in quartz using a regenerative-dose single-aliquot protocol. *Radiation Measurements*, 1998, 29: 503~515[DOI]
- 19 李汉鼎, 冷雪天, 白燕, 等. 泥炭样品 ^{14}C 年龄可靠性初步研究. *海洋地质与第四纪地质*, 1992, 12(2): 89~97
- 20 Stuiver M, Reimer P J. Extended ^{14}C data base and Calib3.0 ^{14}C age calibration program. *Radiocarbon*, 1993, 35(1): 215~230
- 21 Shore J S, Bartley D D, Harkness D D. Problems encountered with the ^{14}C dating of peat. *Quaternary Science Reviews*, 1995, 14: 373~383[DOI]
- 22 Stuiver M, Reimer P J, Bard E, et al. INTCAL98 radiocarbon age calibration 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, 1998, 40: 1041~1083
- 23 Schumm S A. *The Fluvial System*. Hoboken: John Wiley and Sons, 1977. 211
- 24 Martin C W. The response of fluvial systems to climate change: An example from the central Great Plains. *Physical Geographics*, 1992, 13: 101~114
- 25 Bridgland D R. River terrace systems in north-west Europe: An archiver of environmental change, uplift and early human occupation. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 1293~1303[DOI]
- 26 Formento-Trigilio M L, Burbank D W, Nicol A, et al. River response to an active fold-and-thrust belt in a convergent margin setting, North Island, New Zealand. *Geomorphology*, 2002, 49: 125~152[DOI]
- 27 Starkel L. Climatically controlled terraces in uplifting mountain areas. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22: 2189~2198[DOI]
- 28 Ashworth P J, Best J L, John M. Relationship between sediment supply and avulsion frequency in braided rivers. *Geology*, 2004, 32(1): 21~24[DOI]
- 29 Maddy D, Bridgland D. Accelerated uplift resulting from Anglian glacioisostatic rebound in the Milldle Thames Valley, UK—Evidence from the river terrace record. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 1581~1588[DOI]
- 30 Li Y L, Yang J C, Xia Z K, et al. Tectonic geomorphology in the Shanxi Graben System, northern China. *Geomorphology*, 1998, 23: 77~89[DOI]
- 31 Holbrook J, Schumn S A. Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: A brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. *Tectonophysics*, 1999, 305: 287~306[DOI]
- 32 Melton F A. Aerial photographs and structural geology. *Journal of Geology*, 1959, 67: 351~370
- 33 Maddy D. Uplift-driven valley incision and river terrace formation in southern England. *Journal of Quaternary Science*, 1997, 12: 539~545[DOI]
- 34 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[DOI]
- 35 Li J J, Fang X M, Voo R V, et al. Magnetostratigraphic dating of river terraces: Rapid and intermittent incision by Yellow River of the north-eastern margin of the Tibetan Plateau during the Quaternary. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 10121~10132[DOI]
- 36 Pelzer G, Tapponnier P, Armijo R. Magnitude of late Quaternary left-lateral displacements along the north edge of Tibet. *Science*, 1989, 246: 1285~1289
- 37 Bendick R, Bilham R, Freymueller J T, et al. Geodetic evidence measurements of crustal motion in southwest China. *Geology*, 1997, 25: 179~182[DOI]
- 38 Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measure. *Science*, 2001, 294: 574~577[DOI]
- 39 张培震, 王琪, 马宗晋. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场. *地学前缘*, 2002, 9(2): 443~450

(2004-10-25 收稿, 2005-01-11 收修改稿)