

祁连山东段河流阶地的形成时代与机制探讨

高红山¹, 潘保田¹, 邬光剑², 李吉均¹, 李炳元³, Douglas Burbank⁴, 业渝光⁵

(1 兰州大学西部环境教育部重点实验室和地理科学系, 甘肃 兰州 730000; 2 中国科学院寒区旱区
环境与工程研究所冰芯与寒区环境重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3 中国科学院地理科学与
资源研究所, 北京 100101; 4 Department of Geological Sciences, University of California, Santa
Barbara, California 93106, USA; 5 国土资源部青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:第四纪期间祁连山东段发育了多级洪积台地与河流阶地, 它们是研究区域构造活动与气候变化良好的载体。对该区主要河流阶地序列的野外考察, 利用 ESR、TL、IRSL 以及 ^{14}C 等测年方法, 研究表明, 第四纪期间石羊河上游的各大支流普遍发育了 5~6 级阶地, 其中南营村附近金塔河五级河流阶地的形成时代大致为 1.24 Ma B.P. (T_5)、0.78 Ma B.P. (T_4)、0.14 Ma B.P. (T_3)、0.06 Ma B.P. (T_2) 和 0.01 Ma B.P. (T_1), 完全可以与该区沙沟河、黄河兰州段以及长江三峡段的阶地序列相对比。从各级阶地砾石层的堆积时代以及阶地的沉积特征分析, 我们认为, 即使在构造活动区域, 气候变化在河流地貌演化过程之中起着重要的控制作用。

关键词:形成时代; 成因; 河流阶地; 祁连山东段

中图分类号: P593/P534.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2005)02-0197-06

河流阶地是过去的河床但现今已被废弃的地貌, 其发育和变形特征对构造活动、气候变化以及基准面升降等因素的反应比较敏感。区域或局部构造抬升、气候变化以及由此引起的河流水量和泥沙量的变化等都可能造成河流下切而形成阶地。所以应用阶地资料分析区域构造演化和古气候环境变迁是地貌学重要的方法之一^[1-3]。

祁连山东段北麓发育着一系列河流, 自东向西有沙沟河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河和西大河等, 其中西大河经永昌北入金川峡流向沙漠, 而其它河流在武威市北汇聚始称石羊河, 向北流入民勤县后最终消失于沙漠之中(图 1)。过去学者们曾对该区河流阶地做了大量的工作, 但就其形成年代而言, 结果存在着较大的分歧(表 1), 多数学者认为它们是晚更新世乃至全新世以来构造活动的产物^[4-6], 而有的学者认为沙沟河的阶地序列却可以与黄河、长江等大型河流相对比^[7-9]。地貌面的定年历来是地貌分析的基础与前提, 但在具体研究过程中, 常常由于缺乏合适测年的材料以及测年技术的限制等因素, 难于取得可靠的年代数据。通过野外考察及室内研究, 我们对该区主要河

流的阶地序列进行详细的年代学研究, 并对其成因进行简要探讨。

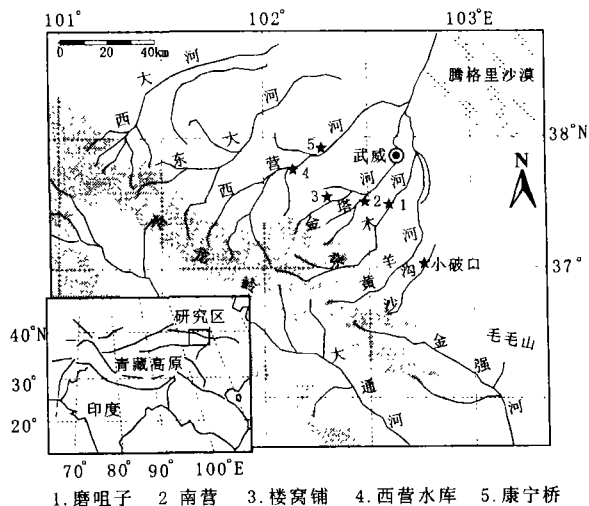


图 1 研究区位置及采样地点略图

Fig. 1 Location of studied region and the sampling sites

1 方 法

虽然目前适用于第四纪定年的方法很多, 但每种方法都因测年所用的物质、被测事件的性质和给

收稿日期: 2004-04-19; 修订日期: 2004-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(40171010)、教育部博士点基金项目(20030730017)以及教育部青年教师奖励基金(教人司 2000-26)资助。

作者简介: 高红山(1977-), 男, 山东汶上县人, 博士生, 主要从事地貌演化与第四纪环境研究。E-mail: pangroup@lzu.edu.cn

表 1 祁连山东段北麓河流阶地与 大夏河、长江(三峡段)阶地年龄(ka B. P.)对比

Table 1 Ages of river terraces in the northern front of Qilian Mountains comparing with the Daxia River and the Yangtz River (ka B. P.)							
	黄羊河	杂木河	金塔河	沙沟河	大夏河	长江	
T1	<10	4.33 ± 0.36		10	10	10 ~ 30	
T2	32.24 ± 4.83	19.8 ± 1.5	5.04 ± 0.07	32.00	55	50 ~ 60	
T3	64.10 ± 8.97	30.6 ± 2.4	10.50 ± 0.5	64.00	120	110 ~ 151	
T4	73.42 ± 11.01	39.2 ± 3.1	14.89 ± 1.18	73.00	600	490	
T5	92.88 ± 16.71	58.9 ± 0.6	36.7 ± 2.97	93.00	1100	730	
T6		85.3 ± 6.7			1400	860	
T7		110.3 ± 8.7			1660	1160	
资料	杨景春等,	侯康明等,	侯康明等,	郑文涛等,	潘保田等,	Li Jijun et al. ,	Li Jijun et al. ,
来源	1998	1998	1998	2000	2000	1997	2001

出年龄的方式而有一定的局限性^[10]。例如我们曾在沙沟河第四级阶地砾石层顶部黄土底部测得两个 TL 年代,分别为 262 ± 19 ka B. P.、247 ± 18 ka B. P.,这与 T₃ 之上黄土底部的 TL 年龄 225 ± 17 ka B. P. 相接近,但是通过气候地层学研究,T₄ 的形成年代应在 0.42 Ma B. P. 前后^[7]。这说明目前 TL 技术难以满足更老物质的测年要求。而过去对于该区河流阶地的研究,多数学者所采用的方法均为 TL 技术^[4~6],故其结论一般认为该区河流阶地是晚更新世乃至全新世构造运动的产物,而与沙沟河的阶地序列大相径庭。鉴于近年 ESR 技术在各类沉积物测年的成功应用^[9,11],此次我们主要采集高级阶地砾石层中细沙物质用于 ESR 测年,同时结合 TL、IRSL(表 2)、¹⁴C 等方法进行综合研究。

电子自旋共振测年(ESR dating)是近年来迅速发展起来的一种测定第四纪物质年代的技术。其基本原理是,样品晶格中一些缺陷、电子或空穴中心,由于受到样品本身或周围物质中铀、钍、钾等杂质放射性衰变所造成的电离辐射,能导致未偶电子的浓度与时间成正比。在高磁场中可以观测到电子自旋共振的微波信号,以确定顺磁电子的数目,从而达到测年的目的^[12]。

所有样品均是在避光的条件下采集砾石层中的细砂物质,后在室内首先将采集的样品分成两份。一份筛取 0.1 ~ 0.5 mm 粒级,在水中冲洗干净,加入 H₂O₂ 除去有机物。用水冲洗干净后在稀 HCl 中浸泡两天除去碳酸盐。水洗后在浓 HF 中酸蚀 6 小时左右以剔除大部分长石。水洗后在 40℃

表 2 样品光/热释光测年结果及参数

Table 2 Results and correlative parameters of TL/IRSL dating								
实验 室号	含水量 (%)	U (μg/g)	Th (μg/g)	K ₂ O (%)	年剂量率 (Gy/ka)	等效剂量 (Gy)	年龄 (ka)	备 注
Pan-6	4.7	2.74	12.22	2.27	4.75	517 ± 17	108.8 ± 7.2	南营村 T ₃
IRPan-7	2.6	3.67	10.52	2.14	4.70	342.2 ± 33	72.8 ± 7.2	南营村 T ₃
Pan-8	2.6	3.72	11.31	2.34	5.37	301.1 ± 5.3	56.1 ± 3.5	南营村 T ₂
IRPan-9	2.6	3.85	11.67	2.23	5.25	395.6 ± 11	75.4 ± 4.9	西营河 T ₃

注: 样号前加 IR 者为红外释光测年,其它为热释光测年。

以下烘干。用磁选仪去掉磁性矿物,处理后的样品等分 9 份,每份约 300 mg,用⁶⁰Co γ 源以不同的剂量进行人工辐照。然后将样品放置 10 d,用 ECS-106ESR 谱仪(德国 BRUKER 公司)测试样品的波谱曲线与信号强度(见图 2A)。测试条件为:室温、X 射线波段、微波功率, E 心用 0.1 mW, Ge 心用 2 mW,调制幅度 0.08 mT,磁场扫描范围 334 ± 5 mT。样品的 ESR 信号强度与⁶⁰Co 剂量呈良好的线性相关关系(图 2B),采用线性方程拟合外推至 ESR 信号强度为零时,即可得到样品自形成以来所

受辐射总剂量(AD)。另一份样品用玛瑙研钵研磨,全部过 200 目筛。将过筛的样品混合均匀,取 5g 左右,用激光荧光法、比色分光光度法和原子吸收技术分别测定 U、Th、K₂O 的含量,即可计算出样品的年辐射剂量率(d)^[13]。样品的 ESR 年龄(t)用公式 $t = AD/d$ 求得。式中,t 为年龄(ka),AD 为总剂量(Gy),d 为年剂量率(Gy/ka)。所有测试均在国土资源部青岛海洋地质研究所来完成,其结果见表 3。

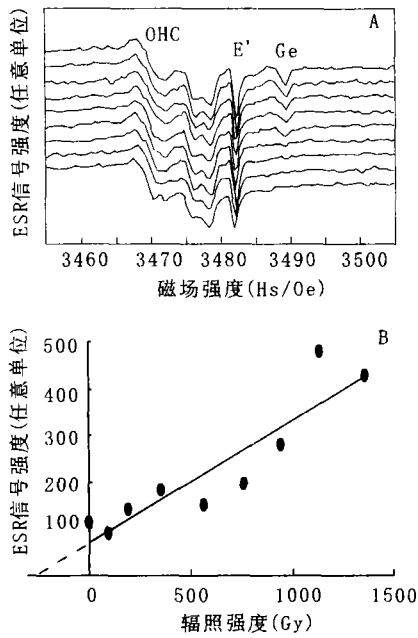


图2 测试样品(Pan-2017)的ESR波谱及ESR信号强度增长曲线图

Fig. 2 The ESR spectra of quartz extracted from the samples and the linear fitting between the ESR signal intensities and artificial irradiation doses

2 结 果

由于研究区内河谷多为深切峡谷,阶地一般分布较窄,若断若续,在没有系统确切的年代控制之下,将上下游的阶地进行对比是十分困难的。现只将主要考察地点的阶地序列及其年代简述如下:

2.1 杂木河阶地

杂木河在磨咀子附近发育了5级阶地(图3A),阶地砾石层一般厚约3~4 m。砾石岩性复杂,主要有花岗岩、紫色砂岩、青灰色变质岩等。砾径一般5~10 cm,大者可达30~40 cm。砾石磨圆度高,绝大多数为圆状。其中 T_4 与 T_3 砾石层的ESR年龄分别为 126 ± 19 ka B. P.、 67.4 ± 10 ka B. P.。

2.2 金塔河阶地

南营村附近金塔河发育了5级阶地,河谷最上部为一期剥蚀面(图3B)。各级阶地特征和形成年龄为:第五级阶地(T_5):基座阶地,拔河高度为120~130 m。砾石层厚约10 m,砾石的磨圆度高,岩性复杂,以花岗岩为主。砾径一般为10~20 cm,

表3 样品测试的相关参数及ESR年龄

Table 3 Results and correlative parameters of ESR dating

实验室号	U ($\mu\text{g/g}$)	Th ($\mu\text{g/g}$)	K ₂ O (%)	含水量 (%)	D (Gy/ka)	AD (Gy)	ESR年龄 (ka)	采样地点
Pan-2004 *	2.03	15.5	2.37	3.11	3.765	2956.8	785 ± 118	南营村 T_4
Pan-2006 *	2.21	9.9	2.93	4.83	3.800	4739.9	1247 ± 187	南营村 T_5
Pan-2014	2.15	14.4	2.7	1.76	4.054	950.3	234 ± 35	西营水库 T_4
Pan-2015 *	6.42	16.3	2.56	0.57	5.253	5347.8	1018 ± 153	西营水库 T_5
Pan-2016 *	3.19	24.5	3.99	4.14	6.093	5129.3	842 ± 126	西营水库 T_6
Pan-2017	2.78	11	2.34	3.08	3.588	268.9	74.9 ± 11	西营水库 T_3
Pan-2018	2.66	12.2	2.83	4.25	4.026	291.9	72.5 ± 11	康宁桥 T_2
Pan-2021	1.76	14.4	2.5	1.39	3.790	255.4	67.4 ± 10	磨咀子 T_3
Pan-2022	2.12	10.7	2.36	1.93	3.453	435.9	126 ± 19	磨咀子 T_4
Pan-2026 *	2.07	15.2	2.62	2.94	3.976	4947.3	1244 ± 187	楼窝铺 T_4

注: * 为E'心年龄,其余为Ge心年龄。

大者可达50~80 cm。其上覆盖15~20 m的黄土。砾石层的ESR年龄为 1247 ± 187 ka B. P.,这与上游楼窝铺附近最高级阶地的年龄(ESR: 1244 ± 187 ka B. P.)相近,说明它们应为同一级阶地。

第四级阶地(T_4):基座阶地,拔河高度约80 m。砾石层特征与 T_5 大致相似,顶部堆积着10~15 m的黄土。砾石层的ESR年龄为 785 ± 118 ka B. P.。

第三级阶地(T_3):堆积阶地,砾石层顶拔河约30 m,未见底。砾石磨圆度高,岩性复杂,以花岗岩为主,含灰黑色砂岩、变质岩等。砾径一般为10~20 cm,大者可达80 cm。上覆25 m厚的黄土,颗粒较粗。内含一层棕红色古土壤,厚约0.5 m。底部是具有水平层理的粉砂质细砂。 T_3 的两个测年物质均采自黄土的底部,其结果表明(TL: 108.8 ± 7.2 ka B. P., IRSL: 72.8 ± 7.2 ka B. P.) T_3 下切时期正值 S_1 的发育期间。

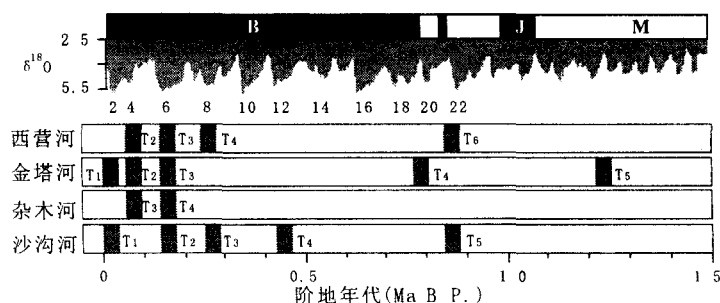


图4 祁连山东段河流阶地堆积时代与深海氧同位素曲线(ODP607)的对比

Fig. 4 Ages of river terraces at the eastern Qilian Mountains comparing with marine record

动^[7,17],尤其是0.8 Ma B.P.左右的“昆仑运动”和0.15 Ma B.P.前后的“共和运动”在青藏高原内部及其周缘都有明显的表现^[18]。这无疑为河流阶地的形成提供了良好的构造背景。所以过去一般将河流阶地作为新构造运动的标志^[4-6]。同时,第四纪期间该区气候变化受全球冰量的控制,主要表现为东亚季风的演变和沙漠周期性的扩张与退缩,冬季风和夏季风在万年尺度上呈相互交替,此消彼涨的耦合关系^[19]。它们对区域地貌的发育演化同样产生了深刻的影响。如沙沟河阶地序列的研究表明,河流阶地砾石层一般堆积在冰期,而下切作用则发生在冰期向间冰期转型时段^[20]。李有利等^[21]通过对河西走廊平原区全新世河流阶地的研究,认为河流的下切期与稳定的湿热气候同期,加积作用则发生在由于向湿或由湿向干的过渡时期。同样从图4中可以看出祁连山东段河流砾石层的堆积一般对应于冰期:如沙沟河T₁、金塔河T₁均为MIS₂阶地,金塔河T₂、西营河T₂以及杂木河T₃均为MIS₄阶地,金塔河T₃、西营河T₃以及杂木河T₄均为MIS₆阶地,沙沟河T₃、西营河T₄为MIS₈阶地,沙沟河T₄为MIS₁₂阶地,金塔河T₄为MIS₂₀阶地,西营河T₆和沙沟河T₅为MIS₂₂阶地等。但是由于各级阶地的沉积特征存在着较大的差异,目前难以判断其下切的确切时段。上述事实可以说明即使在构造活动区域,气候变化对河流系统的加积-下切旋回仍然起着重要的控制作用。已有研究表明^[22],河流系统对基准面变化的响应并不能播及到上游地区。同时根据前人的研究^[21],全新世以来该区河流下切一般发生在气候湿润的背景下,对应于石羊河下游尾间湖(局地侵蚀基准)的高湖面时期^[23]。即基准面的上升而不是下降时,河流阶地形成,故基准面的变化这一因子并不能成为该区河流阶地下切的机制。

致谢:参加野外考察与实验工作的还有管清玉、上官冬辉、王均平、苏怀、赵井东等人,数据处理得到史正涛博士的指导与帮助。TL与IRSL样品由中科院西安地球环境研究所张景昭 and 赖忠平研究员测定,¹⁴C测年由西部环境教育部重点实验室(兰州大学)曹继秀高工及徐齐治高工完成。在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 潘保田,李吉均,朱俊杰,等. 兰州地区黄河阶地发育与地貌演化[A]. 见:中国第四纪冰川与环境研究中心. 中国西部第四纪冰川与环境[C]. 北京: 科学出版社, 1994. 271 ~ 277.
- [2] 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[J]. 第四纪研究, 1998, (3): 238 ~ 248.
- [3] Maddy D, Bridgland D, Westaway R. Uplift - driven valley incision and climate - controlled river terrace development in the Thames Valley, UK [J]. Quaternary International, 2001, 79: 23 ~ 36.
- [4] 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[J]. 第四纪研究, 1998, (3): 229 ~ 308.
- [5] 侯康明,邓起东,刘百篪. 冬青顶背斜的变形形式/变形幅度及形成机理[A]. 见:汪一鹏. 活动断裂研究(第6辑)[C]. 北京: 地质出版社, 1998. 88 ~ 95.
- [6] 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[J]. 地震地质, 2000, 22(3): 318 ~ 328.
- [7] 潘保田,邹光剑,王义祥,等. 祁连山东段沙沟河阶地的年代与成因[J]. 科学通报, 2000, 45(24): 2669 ~ 2675.
- [8] Li Jijun, Fang Xiaomin, Rob Van der Voo, et al. Magnetostratigraphic dating of river terraces: Rapid and intermittent incision by the Yellow River of the northeastern margin of the Tibetan Plateau during the Quaternary[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 105(B5): 10121 ~ 10132.
- [9] Li Jijun, Xie Shiyong, Kuang Mingsheng. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation[J]. Geomorphology, 2001, 41: 125 ~ 135.
- [10] Watchman A L, Twidale C R. Relative and 'absolute' dating of land surfaces[J]. Earth - Science Reviews, 2002, 58: 1 ~ 49.

- [11] 史正涛, 业渝光, 赵志军, 等. 酒西盆地晚新生代地层的 ESR 年代[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(增): 163 ~ 168.
- [12] 业渝光, 刁金波, 和 杰, 等. 沉积物的 ESR 测年[J]. 地球学报, 1996, 17(增): 168 ~ 175.
- [13] Bell W T. Thermoluminescence dating: Radiation dose rate data [J]. Archaeometry, 1979, 21: 243 ~ 245.
- [14] Molodkov A. ESR dating of Quaternary shells: recent advances [J]. Quaternary Science Reviews, 1988, 7: 477 ~ 484.
- [15] Schumm S A. The Fluvial System[M]. New York: Willey, 1977. 338.
- [16] Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 2001, 294: 1671 ~ 1676.
- [17] 赵志军, 史正涛, 方小敏. 祁连山北缘早中更新世新构造运动的地层记录[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 92 ~ 98.
- [18] 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.
- [19] 郭光剑, 潘保田, 李吉均, 等. 祁连山东段 0.83 Ma 以来的构造-气候事件[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(增): 202 ~ 208.
- [20] Pan Baotian, Burbank D, Wang Yixiang, et al. A 900 ky. record of strath terrace formation during glacial-interglacial transitions in northwest China[J]. Geology, 2003, 31(11): 957 ~ 960.
- [21] 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[J]. 地理科学, 1997, 17(3): 248 ~ 252.
- [22] Schumm S A. River response to baselevel change: implications for sequence stratigraphy[J]. Journal of Geology, 1993, 101: 279 ~ 294.
- [23] Zhang Hucai, Wunnemann B, Ma Yuzhen, et al. Lake level and climate changes between 42 000 and 18 000 ^{14}C yr B. P. in the Tengger Desert, Northwestern China[J]. Quaternary Research, 2002, 58: 62 ~ 72.

Age and Genesis of Alluvial Terraces in East Qilian Mountains

GAO Hong-Shan¹, PAN Bao-Tian¹, WU Guang-Jian², LI Ji-Jun¹

LI Bing-Yuan³, DOUGLAS Burbank⁴, YE Yu-Guang⁵

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000; 2. Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000; 3. Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 4. Department of Geological Sciences, University of California, Santa Barbara, California, 93106, USA; 5. Institute of Marine Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao, Shandong 266071)

Abstract: Based on field investigation, we find that the rivers generally developed 5-6 terraces in the east Qilian Mountains during the Quaternary. According to the ESR (Electron spin resonance), TL (Luminescence), IRSL (Infra-red stimulated luminescence) and ^{14}C dating methods, the ages of the Jinta River terraces are 1.24 Ma B. P. (T_5), 0.78 Ma B. P. (T_4), 0.14 Ma B. P. (T_3), 0.06 Ma B. P. (T_2), and 0.01 Ma B. P. (T_1) from up to down. The Xiying River developed 6 terraces near the Xiying Reservoir, some ages are 0.84 Ma B. P. (T_6), 0.25 Ma B. P. (T_4), 0.14 Ma B. P. (T_3), 0.06 Ma B. P. (T_2). These terrace sequences can be roughly correlated with the stepped landforms found in upstream Yellow River and Yangtze River watersheds. After careful analyses on the ages of gravel bed accumulations and the ages of channel down-cuttings, we propose that climate variations play significant roles in controlling river terrace evolutions even within the tectonic active regions.

Key words: alluvial terraces; chronology; genesis; Qilian Mountains