

渭河上游陇西段河流阶地的形成时代及其成因^{*}

潘保田^{**} 刘小丰 高红山 王勇 李吉均

兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

摘要 野外考察发现渭河在其上游陇西县城附近共发育了七级河流阶地, 阶地都具有砾石层和河漫滩组成的二元相结构, 并且上覆不同厚度的黄土地层. 应用古地磁、OSL、¹⁴C 和黄土古土壤序列等定年方法, 初步确定了各级阶地的形成时代. 同时根据阶地的沉积特征和年代数据的分析, 发现构造运动和气候变化共同控制着该区渭河阶地的形成, 构造抬升为河流提供了下切空间, 气候变化则控制着渭河侧蚀堆积和下切过程, 河流加积作用一般发生在冰期, 而下切过程发生在从冰期向间冰期转型时期. 另外通过阶地形成年代和拔河高度的线性分析, 得到了 870 ka 以来该区渭河平均下切速率为 0.2 m/ka, 与区域其他河流下切速率有所不同, 可能反映了秦岭造山带更新世期间构造活动的时空差异.

关键词 黄土地层 河流阶地 气候变化 渭河上游

渭河是黄河最大的一级支流, 其形成发育及其与黄河之间的关系近一个世纪以来备受关注. 虽然研究者众多, 但结论并不相同. 如 Clapp^[1] 和 Babour 等^[2] 认为渭河很可能是黄河的古河道. 丁骞^[3] 进一步推断中新世至上新世古黄河经洮河至渭河河道东流, 早更新世期间随着陇西缺口的抬升, 两者在上游隔断了联系. 徐叔鹰^[4] 则认为这一事件发生在早更新世末期. Lin Aiming 等^[5] 根据新生代沉积地层的研究, 认为始新世期间古黄河流入渭河, 而目前围绕鄂尔多斯高原的黄河在晚中新世至早上新世即已出现. 而陈云等^[6] 认为渭河在 500 ka 左右才切穿宝鸡峡贯通陇西盆地. 鉴于河流阶地是古河道存在和河流地貌演化的直接证据, 多年以来中外学者即对渭河阶地进行了大量的研究且已经取得了较大的进展, 如渭河宝鸡地区共发育了五级阶地, 岳乐平、雷祥义等^[7,8] 认为最高级阶地(T₅)的形成年代为 1.2 Ma, 而 Sun 认为该区最高级阶地(T₅)形成于 2.6 Ma 左右, 是此时印度板块向欧亚板块快速俯冲的结果^[9]. Porter 等^[10] 则是通过渭河

下游支流灞河阶地的研究, 提出该区河流阶地的形成是更新世期间气候变化作用的结果. 而对于宝鸡峡以上渭河上游河段, 受关注的程度及其研究力度较小, 更鲜见精确的阶地形成年代研究^[4,11], 这无疑不利于我们明确渭河的发育历史. 而该区地处青藏高原、秦岭和黄土高原的交际地带(图1), 季

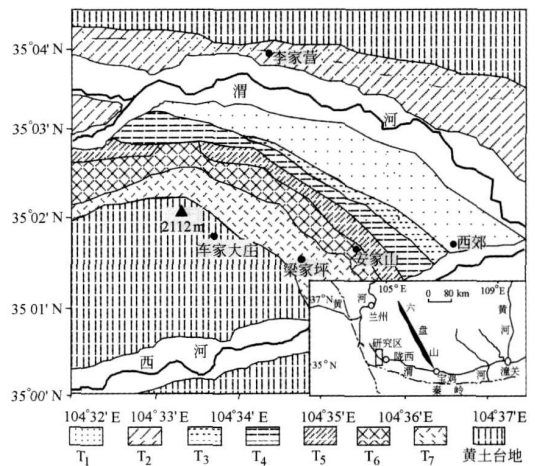


图 1 研究区位置及陇西段渭河阶地分布图

2006 11 30 收稿, 2007 03 06 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 40401007, 40471016)、创新研究群体科学基金(批准号: 40421001)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2005CB42001)资助项目

^{**} E-mail: panbt@lzu.edu.cn

风三角的边缘^[12], 第四纪期间构造活动强烈^[13], 气候变化频繁^[14, 15], 共同制约着地表景观形成和发育. 近年来我们通过对渭河上游陇西段河流地貌的调查研究, 获得了该区河流阶地的形成时代进而对其成因进行探讨.

1 陇西地区的渭河阶地序列

渭河发源于甘肃省渭源的鸟鼠山, 沿着秦岭北麓向东流, 至陕西潼关汇入黄河, 全长达 818 km (图 1). 宝鸡峡以上, 河道狭窄, 盆地之间为峡谷所串联, 构成串珠状地形的平面轮廓. 陇西盆地即为渭河上游小型山间盆地, 距河源仅 50 km. 盆地内第三系红层广泛出露, 随着河流的侧蚀和下切作用在河谷两侧形成了多级阶地. 野外调查发现, 在陇西县城西郊安家山一带, 渭河共发育了七级阶地, 阶地主要分布在渭河南岸 (图 1, 图 2).

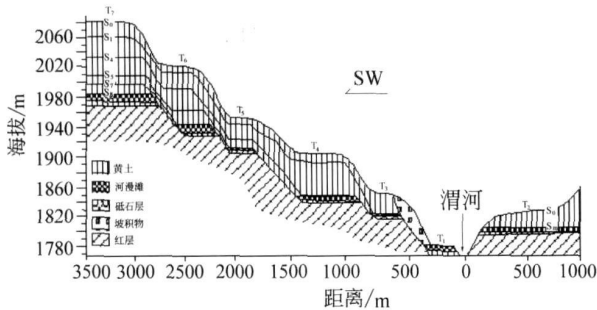


图 2 陇西段渭河阶地序列

第七级阶地 (T_7), 基座阶地, 分布在河流的南岸, 在安家山一带分布最为广泛. 基座为第三系红层, 其顶海拔 1977 m, 高出河床约 197 m. 上覆约 5 m 厚的河床相砾石层, 最大砾径可达 40 cm, 砾石以青灰色粉砂岩与红色砂岩为主, 含一定的砾岩及石英岩. 砾石层顶部为一层 20 cm 的红色粗沙层, 向上为 3 m 的具有水平层理的河漫滩相物质, 上覆风成黄土 104.5 m.

第六级阶地 (T_6), 基座阶地, 基座为第三系红层. 红层顶面海拔 1922 m, 拔河 142 m. 砾石层厚为 5 m, 磨圆度较高, 以次圆为主, 岩性与上一级阶地一致, 砾石最大直径为 30 cm. 砾石层顶部发育着 4 m 的青灰色粗沙与红色粗沙的互层, 具有水平层理, 与砾石层组成阶地的二元结构, 上覆风成黄土 79 m.

第五级阶地 (T_5) 以红层为基座, 分布较窄, 红层顶部海拔 1904 m, 拔河 126 m. 砾石层厚度约 2 m, 砾石以次圆为主, 砾石与粘土混杂, 沙含量较少, 砾石最大直径为 20 cm. 岩性以砂岩为主, 并有少量的石英岩. 砾石层上部发育了 2—3 m 的具有水平层理的河漫滩粉沙, 上覆风成黄土 33.5 m.

第四级阶地 (T_4), 基座阶地, 基座为第三系红层, 红层顶海拔 1830 m, 拔河 52 m. 砾石层厚度为 10 m, 分为三层: 下部砾石层厚约 3 m, 砾石较小, 分选性较高, 磨圆度较高, 以次圆为主, 砾径一般都在 10 cm 左右; 中间一层厚约 2 m 的红色粗沙层; 上部砾石层厚约 4 m, 砾径很大, 有些可达 30 cm, 磨圆度不如下部, 以次圆, 次棱角为主. 岩性以红色砂岩与青灰色砂岩为主, 另含一些砾岩, 石英岩等. 砾石层顶部发育 6 m 厚的河漫滩粉沙, 上覆 58.5 m 的风成黄土.

第三级阶地 (T_3), 基座阶地, 基座为第三系红层, 红层顶海拔 1808 m, 拔河 30 m. 砾石层厚度约 2 m, 砾径最大可达 40 cm, 以青灰色砂岩为主. 其上堆积了约 3 m 的粗沙, 并与小砾互层, 在向上为 3 m 具有水平层理的河漫滩粉沙, 上覆风成黄土 32.5 m.

第二级阶地 (T_2), 基座阶地, 典型剖面位于李家营, 基座为第三系红层, 红层顶海拔 1801 m, 拔河 23 m. 主要分布在渭河北面. 砾石层厚度 3 m. 砾石层上发育了 8 m 的河漫滩粉沙, 沙粒较粗, 具水平层理, 上覆风成黄土 15 m.

第一级阶地 (T_1), 堆积阶地, 沿河两岸均有所发育, 是聚落和工农用地的主要场所, 砾石层未见底, 其上堆积着 3.3 m 左右的黄土状物质, 内夹沙层和小砾石, 在 0.5 m 及 1.3 m 处发育着两层泥炭层.

2 测年方法与结果

在中国中部利用河流阶地上覆黄土地层确定阶地形成年代是近年来较为常用的方法, 最底部风成黄土年代代表了阶地下切年代^[6-10], 陇西段渭河阶地上覆不同厚度的黄土, 为阶地年代的确定提供了较好的介质 (图 3). 本文通过古地磁学、OSL、¹⁴C 及黄土古土壤序列的方法对阶地上覆黄土进行了年

代测定, 初步确定了渭河上游河流阶地的形成年代. 古地磁的分析测试在中国科学院地球物理研究所进行的, OSL 在中国科学院兰州寒区及旱区环境

与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室释光实验室完成的, ^{14}C 测年结果由兰州大学年代学实验室完成.

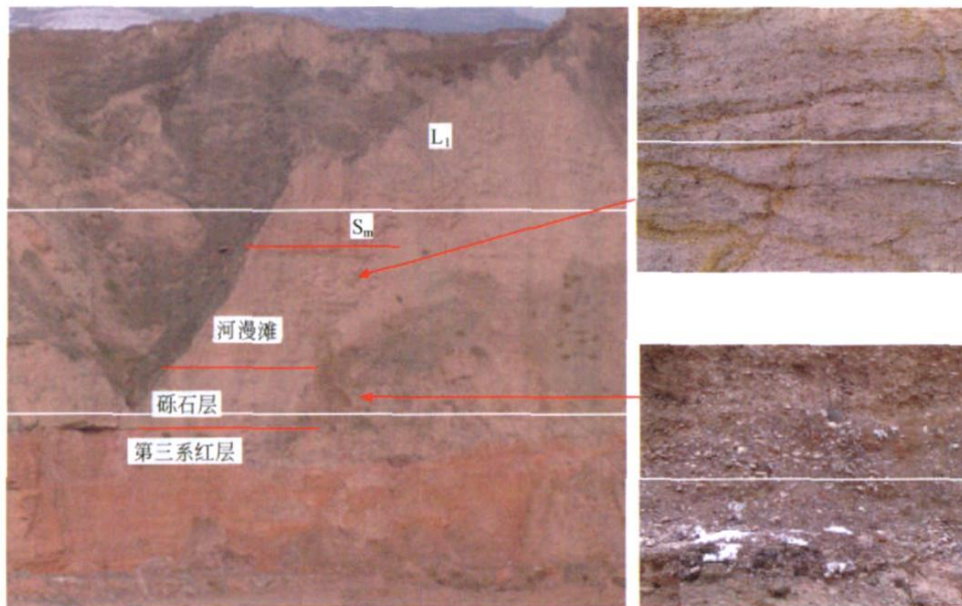


图 3 渭河陇西段阶地上覆黄土古土壤序列(以 T_2 为例)

T_7 : 此级阶地上共堆积了 104.5 m 的风成黄土, 共发育了 10 层古土壤(S_0, S_m-S_8), 通过地层划分及粒度指标可以确定最底部为 S_8 . 对剖面下部(0—16 m)按 0.5 m 的间隔, 中部(17—60 m)按 1 m 的间隔, 上部(61—105 m)按 2 m 的间隔采样, 共采得古地磁年代样品 97 组 291 个样品. 样品分析采用热褪磁分析方法, 按照 50°C 的温度间隔进行, 根据样品的褪磁特征加热到 550°C 或 580°C , 大部分样品加热到 300°C 可以明显褪掉次生剩磁, 获得原生剩磁, 部分样品需要加热到 350°C . 将测量结果与标准古地磁年表^[19]进行对比, 可以发现距底部 5 m 处属于正负极性转换的 B/M 界限, 年代为 780 ka (图 4), 该位置在岩石地层上位于黄土层 L_8 中, 这与黄土高原其他地区黄土磁性地层学研究得到的 B/M 界限位置是一致的^[17,18]. 根据粒度曲线可知在距底 3—5 m 之间只存在一个古土壤 S_8 , 下部的河漫滩及砾石层应为冰期发育时堆积的产物^[10], 其形成于 L_9 发育时期, 从年代上分析可知在距底 1.5—3 m 处短暂的正极性事件应为后贾亚米洛事件^[19](图 4), 在六盘山以东也有记载, 此事件被称

为蓝田事件^[20], 在黄土记录中也对应于 L_9 发育时期. 因此, T_7 剖面风成黄土底部年龄为 S_8 的年龄, S_8 的底部年龄约为 865 ka^[21], 这也是第七级阶地的形成年代, 大约为 870 ka.

T_6 : 此级阶地上共堆积了 79 m 的风成黄土, 共发育了 8 层古土壤(S_m-S_7), 最底层为 S_7 . 剖面下部(0—5 m, 包括 3 m 河漫滩)按 0.5 m 的间隔, 上部(6—79 m)按 1 m 的间隔进行采样, 共采得古地磁样品 83 组 249 个样品. 样品的测量和第七级样品一样, 测量结果显示在距底部 3 m 为正负极性转换的 B/M 界限, 年代为 780 ka(图 4), 河漫滩应为 L_8 时期堆积的产物, 根据野外观测发现 B/M 界限上面的古土壤应为 S_7 , S_7 的底部年龄为 787 ka^[21], T_6 下切形成阶地的年代大约为 790 ka.

对于渭河的低级阶地(T_5, T_4, T_3, T_2, T_1), 上覆黄土较薄, 黄土古土壤序列能够很好地对其进行年代的确定. 粒度曲线结合 OSL 得到了 T_5, T_4, T_3, T_2 的上覆黄土最底部分别对应于古土壤 S_5, S_4, S_1, S_m (图 5), 阶地的形成年代分别为 620 ka、420 ka、130 ka、60 ka^[21]. T_1 在剖面底部 0.9 m 和

1.4 m 处采集 ^{14}C 样品两个, 年代分别为 (3381 ± 68) aBP 及 (1519 ± 90) aBP, 可以肯定的是阶地形成于

全新世, 所以阶地形成年代不会早于 10 ka, T_1 形成应该在 10ka 以来.

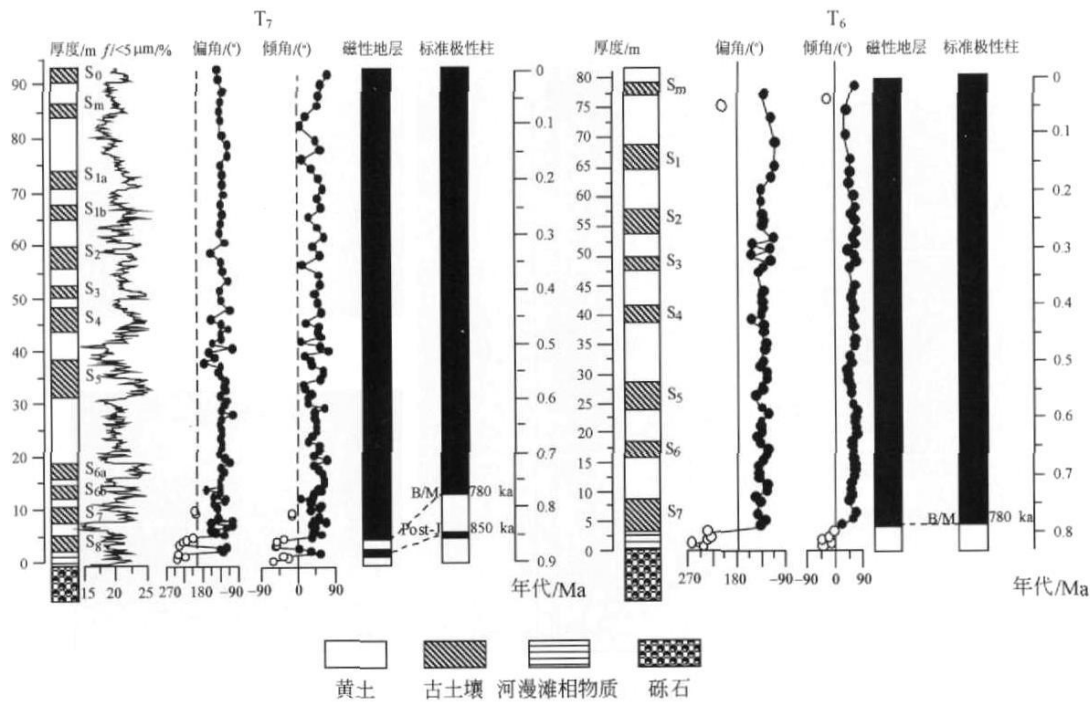


图 4 T_7 , T_6 上覆黄土地层学及古地磁年代

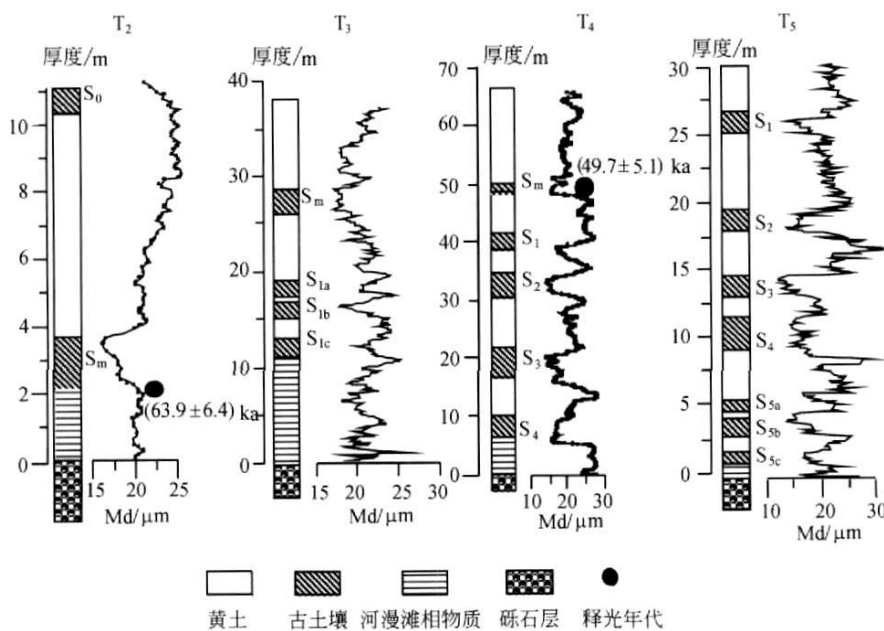


图 5 T_2 , T_3 , T_4 , T_5 阶地上覆黄土地层学

3 陇西段渭河阶地的成因

河流阶地的形成主要是气候变化、构造运动、基准面变化等作用的结果^[23]。研究表明^[23]基准面的变化对河流地貌的影响距离不会超过 400 km, 研究区距我国边缘海达 1500 km, 即便以黄河为局地基准面, 其距离也超过 400 km。显然陇西段渭河阶地的形成与基准面升降无关。鉴于研究区地处青藏高原、秦岭和黄土高原的交际地带, 第四纪期间构造活动强烈^[13], 气候变化频繁^[14, 15], 该区河流阶地的形成必然与构造活动和气候变化密切相关。

渭河位于秦岭的北麓, 由于阶地是古地形面的残余, 它较忠实地记录了地面抬升历史^[24], 因此可以认为渭河上游的河流阶地在一定程度上反映了西秦岭的抬升历史。通过阶地研究本文能够较好地恢复河流的下切速率, 虽然河流的下切速率并不能准确地反映地面抬升速率, 但是其能够反映地面总的变化趋势^[25], 在特定情况下能够反映地面的抬升速率^[26]。图 6 说明了渭河自 870 ka 以来的河流下切速率 0.2 m/ka, Wang^[27] 通过乾佑河两岸喀斯特溶洞的研究认为秦岭内部地区在晚更新世以来河流平均下切速率为 0.31 m/ka, 自更新世以来岷江的下切速率为 1.5 m/ka^[28]。更新世以来河流下切速率的不同反映了该地区不同区域的构造活动的差异, 秦岭北麓构造活动要弱于秦岭内部地区。

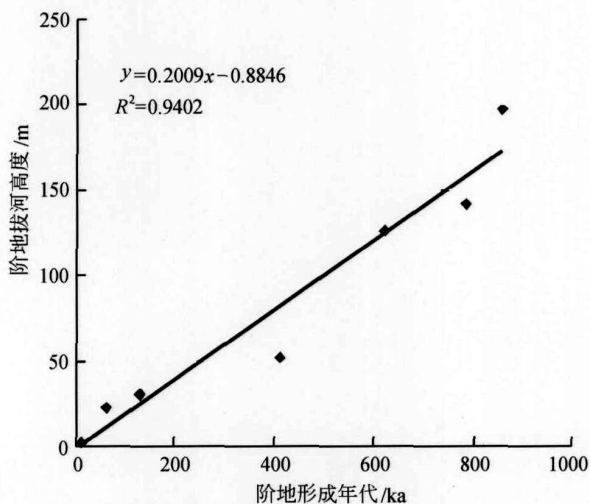


图 6 渭河阶地反映的河流下切速率

渭河在陇西盆地发育的七级阶地上覆风成黄土的最底部都是古土壤, 分别对应于 $S_8, S_7, S_5, S_4, S_1, S_m, S_0$, 表明气候变化在阶地形成中发挥重要的作用。当气候转暖时, 河流流量增大, 植被覆盖茂盛, 河流携带的物质减少, 河流有足够的力量下切形成阶地, 因此本文认为渭河上游阶地下切形成于气候转型时期, 即冰期向间冰期转换时期, 河流的加积则发生在冰期。温暖湿润的气候控制着河流的下切, 而构造抬升为河流下切提供了垂直空间。

4 结论

通过对渭河上游陇西段河流阶地的沉积特征分析及相关年代学的研究, 我们发现渭河在该区出现的年代不晚于 870 ka。在构造活动与气候变化的共同作用下, 更新世期间渭河在陇西安家山地区共发育了七级阶地, 形成时代分别为 870 ka, 790 ka, 620 ka, 420 ka, 130 ka, 60 ka, 10 ka。更新世期间西秦岭北麓的构造抬升为该区河流阶地的形成提供了下切的垂直空间, 而气候在冰期向间冰期转型时期, 河流下切阶地形成。

致谢 参加野外采样及室内分析工作的还有苏怀, 陈莹莹, 孙然好, 王均平, 张慧等, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- Clapp FG. The Huang Ho, Yellow River. The Geographical Review, 1933, 21(1): 1-18
- Barbour G. Pleistocene history of the Huangho. Bulletin of the Geological Society of America 1933, 44(6): 1143-1160
- 丁 骥. 黄河流域之地形变迁与水系演进. 黄河研究资料汇编 (第 31922 种), 黄河流域之地质及土壤, 1952
- 徐叔鹰. 陇中西部黄土区黄河及其支流阶地发育的若干问题. 兰州大学学报(自然科学版), 1965, 17(1): 116-143
- Lin AM, Yang ZY, Sun ZM, et al. How and when did the yellow river develop its square bend? Geology, 2001, 29(10): 951-954
- 陈 云, 董国榜, 曹家栋, 等. 渭河宝鸡段河谷地貌的构造气候响应. 地质力学学报, 1999, 5(4): 49-56
- 岳乐平, 雷祥义, 屈红军. 黄河中游水系的阶地发育时代. 地质评论, 1997, 2(43): 186-192
- 雷祥义, 张猛刚. 渭河中游水系的阶地形成年代. 见: 卢滨涛主编, 新构造运动与环境, 北京: 地震出版社, 2001, 149-

- 9 Sun JM. Long term fluvial archives in the Fen Wei Graben, central China, and their bearing on the tectonic history of the India Asia collision system during the Quaternary. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(10—11): 1279—1286
- 10 Porter SC, An ZS, Zheng HB, et al. Cyclic quaternary alluviation and terracing in a nonglaciated drainage basin in the north flank of the Qinling Shan, Central China. *Quaternary Research*, 1992, 38(2): 157—169
- 11 陈梦雄. 甘肃中部之地文. *地质论评*, 1947, 12(6): 545—556
- 12 Li JJ. The environmental effects of the uplift of Qing Hai XiZang plateau. *Quaternary Science Riview*, 1991, 10(5): 479—483
- 13 Peltzer G, Tapponier P, Zhang Z, et al. Neogene and Quaternary faulting in and along the Qinling Shan. *Nature*, 1985, 317(6037): 500—505
- 14 方小敏, 潘保田, 管东红, 等. 兰州约 60 ka 以来夏季风千年尺度不稳定性研究. *科学通报*, 1999, 44(4): 436—439
- 15 Lu HY, Zhang FQ, Liu XD, et al. Periodicities of palaeoclimatic variations recorded by loess paleosol sequence in China. *Quaternary Science Review*, 2004, 23(18—19): 1891—1900
- 16 Cande SC, Kent DV. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B4): 6093—6095
- 17 Rutter NW, Ding ZL, Evans ME, et al. Magnetostratigraphy of Baoji loess paleosol section in north central China Loess Plateau. *Quaternary International*, 1991, 718(1): 97—102
- 18 Liu XM, Liu TS, Shaw J, et al. Paleomagnetic and paleoclimatic studies of Chinese loess, In: Liu T S, eds. *Loess, Environment and Global Change*. Beijing: Science Press, 1991, 61—81
- 19 陈发虎, 张维信主编. 甘青地区的黄土地层学与第四纪冰川问题. 北京: 科学出版社, 1993, 24—34
- 20 岳乐平, 薛祥熙. 中国黄土古地磁学. 北京: 地质出版社, 1995, 38—41
- 21 Ding ZL, Derbyshire E, Yang SL, et al. Stacked 2.6 Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep sea $\delta^{18}\text{O}$ record. *Paleoceanography*, 2002, 17(3): 1033—1053
- 22 Schumm SA. *The Fluvial System*. Hoboken: John Wiley and Sons, 1977, 338, 211
- 23 Schumm SA. River response to baselevel change: Implications for sequence stratigraphy. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 279—294
- 24 Burbank DW, John Leland, Eric Fielding, et al. Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the northwestern Himalayas. *Nature*, 1996, 379(6565): 505—510
- 25 Li JJ, Fang XM, 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. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B5): 10121—10132
- 26 Maddy D, Bridgland DR, Green CP. Crustal uplift in southern England: Evidence from the river terrace records. *Geomorphology*, 2000, 33(3—4): 167—181
- 27 Wang Fei, Li HC, Zhu RX, et al. Late Quaternary downcutting rates of the Qianyou River from U/Th speleothem dates, Qinling Mountains, China. *Quaternary Research*, 2004, 62(2): 194—200
- 28 Kirby E, Whipple KX, Burchfiel BC, et al. Neotectonics of the Min Shan, China: Implications for mechanisms driving Quaternary deformation along the eastern margin of the Tibetan Plateau. *GSA Bulletin*, 2000, 112(3): 375—393