

黄河山陕峡谷保德-克虎段高阶地砾石层的初步研究*

刘运明 李有利¹⁾ 吕红华 司苏沛 赵洪壮

(北京大学城市与环境学院, 北京, 100871; ¹⁾ 通讯作者, E-mail: liyouli@pku.edu.cn)

摘要 野外考察发现山西黑峪口地区存在七级阶地序列, 其中上覆红粘土的 T6、T7 阶地为晚第三纪阶地。对该区阶地上砾石的岩性和粒径进行了研究, 岩性对比表明, T6、T7 阶地上砾石的岩性与黄河低阶地上砾石的岩性相似, 而与东西向的蔚汾河阶地岩性差别较大; 上下游之间对比发现, 灰岩砾石岩性由保德地区占主导地位到克虎地区退居次要地位, 灰岩砾石的粒径也从上游向下游变小, 说明该区晚第三纪阶地并非东西向河流形成的, 而是古黄河或古南北向水系的产物。T7 阶地上覆盖厚度 70 m 以上的粉、细砂层和晚第三纪红土层, 磁性地层研究表明, 该层的底部时代在 61.8 Ma 左右, T6 阶地上覆红粘土的底部年龄在 31.3 Ma 左右, 山陕峡谷由北向南流的古河流在 61.8 Ma 之前已经形成, T6 阶地的形成时代与青藏运动 A 幕相对应。青藏运动 A 幕以来河流在该区下切了 160 m, 平均下切速率约为青藏运动 A 幕以前平均下切速率的 5 倍以上。

关键词 河流阶地; 红土; 古地磁; 山陕峡谷; 黄河

中图分类号 P 931

Preliminary Study of Alluvial Pebbles on High Terraces of the Yellow River from Baode to Kehu in Shanxi-Shaanxi Gorge

LIU Yunming LI Youli¹⁾ LI Honghua SI Supai ZHAO Hongzhuang

(College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing, 100871;

¹⁾ Corresponding Author, E-mail: liyouli@pku.edu.cn)

Abstract Seven river terraces are recognized based on detailed field investigation in the Heiyukou area, Shanxi-Shaanxi Gorge of the Yellow River, of which the highest T7 and T6 terraces are covered by red clay. The lithology and grain size of pebbles on different terraces along the river are studied. It is found that the lithology of pebbles on the sixth and seventh terrace is similar to that of lower Yellow River terraces and floodplain in the Heiyukou area, but different from that of Weifen River, a tributary of the Yellow River running from east to west. The limestone pebbles, which are dominant pebbles in Baode area, not only become less in amount, but become smaller in grain size from the upstream to the downstream. This indicates that the pebbles of Late Tertiary are the relic of an ancient river running from north to south. Magnetostratigraphy study shows that the bottom age of the strata, 70 m fine sands in lower part and red clay in the upper part, covering on the pebbles of the T7 terrace is about 61.8 Ma, and the bottom age of the red clay covering on the T6 terrace is about 31.3 Ma. This indicates that the ancient river formed at least before 61.8 Ma in this area, and the age of T6 (31.3 Ma) matches well with Phase A of Qinghai-Xizang Movement. There is about 160 m incision in this area after Phase A of Qinghai-Xizang Movement. The average incision rate is more than five times faster than that before Phase A of Qinghai-Xizang Movement.

Key words river terrace; red clay; paleomagnetism; Shanxi-Shaanxi Gorge; Yellow River

* 国家自然科学基金(90102016 和 40571013)资助项目

收稿日期: 2006-12-10; 修回日期: 2007-06-18

0 引言

黄河的形成演化是地学界关注一个重要问题。德日进和杨钟健^[1]、王乃樑^[2]指出山陕峡谷段黄河远在上新世以前已经形成了,袁宝印等^[3]认为山陕峡谷发育保德期黄河宽谷,黄河出现的时代可能在中新世晚期,根据兰州和银川地区构造、沉积物的变化,Lin等^[4]推测在中新世末)上新世初出现了围绕鄂尔多斯断块的黄河河谷,Li等^[5]在佳县县城以北的枣树条村发现上新世的黄河古冲积层。也有相当多的学者认为黄河形成的时代要晚,朱照宇^[6]认为黄河形成于 1167~ 1145 Ma 左右,而热释光测得的克虎地区黄河最高阶地的年代为 1140 Ma 左右^[7],根据兰州地区最高阶地以及黄河支流的测年结果,岳平等^[8]认为黄河的形成时代约在 116 Ma,黄河中游最高阶地上覆 S18 古土壤,据此潘保田等^[9]认为黄河中游最高阶地形成于 113 Ma 左右,古地磁测年结果表明黄河贯通三门峡的时间在 11165 Ma 之前^[10],李吉均等^[11]认为发生在 112 Ma 的黄河运动使黄河切开积石峡进入临夏-兰州盆地,同时切开三门峡东流入海,还有部分学者认为黄河形成于晚更新世^[12]。对黄河形成时代认识的不一,除了测年手段的限制外,该区晚第三纪河流砾石层的归属问题也是争论的一个焦点^[6]。

黑峪口地区不仅存在晚第三纪砾石层,而且有一条发源于吕梁山、东西流向的支流))蔚汾河在此注入黄河,为区域内不同河流的砾石岩性对比提供了便利。我们对该区晚第三纪阶地上的砾石岩性进行了统计,并分别与黄河现代河漫滩及其阶地和蔚汾河阶地以及黄河上下游阶地的统计结果进行了对比,在此基础上讨论了该砾石层的归属。在晚第三纪砾石层上覆地层上采集了古地磁样品,根据古地磁对比结果推断出了阶地形成的年代。

1 区域概况与阶地序列

本区地势东高西低,东侧是吕梁山,发源于吕梁山的河流主要有岚漪河和蔚汾河,其中蔚汾河在黑峪口村南 2 km 的位置注入黄河(图 1)。保德以北,黄河切割于灰岩和含煤页岩之中,保德以南黄河深切入三叠纪砂岩中,在东部吕梁山上还存在早古生代灰岩、太古界和元古界变质岩等。

黑峪口地区阶地保存比较齐全,共可以划分为七级阶地,除最低一级的阶地为堆积阶地外,其他阶地上都保存有砾石层或河流相砂层,为基座阶地。从低到高各级阶地的特征如下(图 2):

T1: 阶地顶面拔河高度约 4 m 以上,为堆积阶地,沿黄河两岸交错分布。阶地面宽 500 m 以上。

T2: 为基座阶地,拔河高度约 12 m 左右,阶地

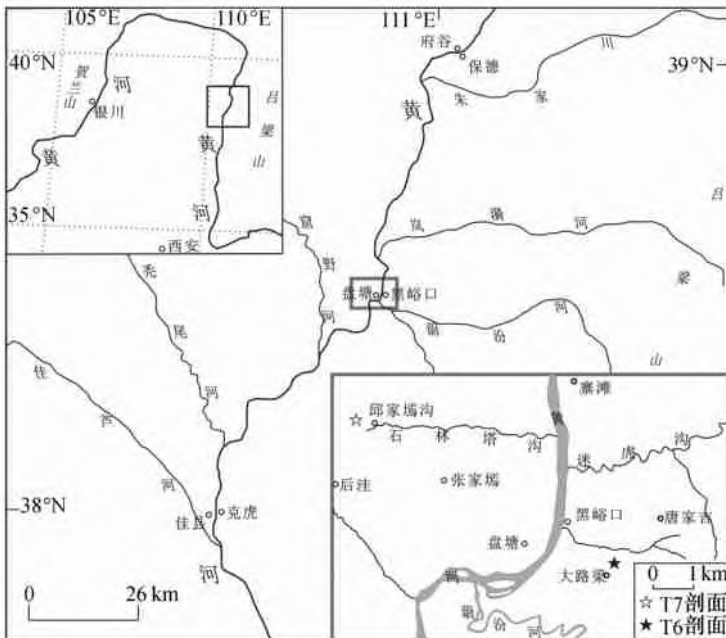


图 1 研究区域与剖面位置

Fig1 Study area and location of sections

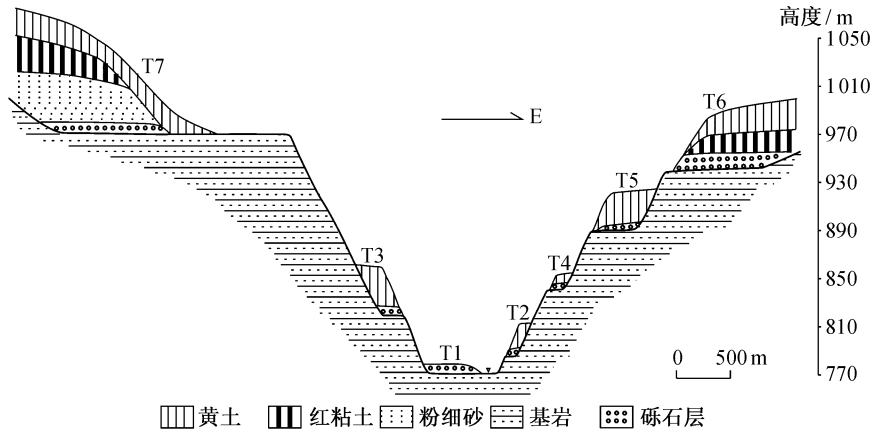


图 2 黑峪口地区黄河阶地序列

Fig2 Terraces of the Yellow River in Heiyukou area

砾石层的厚度约 4 m, 砾石的粒径以 3~ 20 cm 为主, 大粒径砾石一般为砂岩, 灰岩砾石的粒径较小。砾石的磨圆很好, 以极圆和圆为主。砾石层之上覆盖黄土, 最厚可达 20 m 左右。

T3: 基座阶地, 拔河高度约 50 m, 阶地砾石层的厚度为 3 m 左右, 砾石的粒径以 3~ 20 cm 为主, 大粒径砾石为砂岩, 灰岩砾石粒径一般不超过 10 cm, 砾石的磨圆很好。砾石层之上存在河流相砂层, 厚度约 1 m。T3 阶地上覆厚度约 33 m 的黄土, 顶部发育了 3 条弱古土壤。

T4: 基座阶地, 拔河高度约 80 m, 阶地前缘砾石层较薄, 到后缘砾石层的厚度为 2 m 左右。砾石的粒径一般不超过 20 cm, 但最大可达 45 cm 以上, 砾石的磨圆以极圆和圆为主。砾石层上覆黄土保存不好, 厚度仅几米。

T5: 基座阶地, 拔河高度 130 m 左右。砾石层厚度不一, 最大厚度可达 3 m, 一些地方仅出露河流相的砂层。砾石磨圆很好, 可与其他阶地对比。砾石层和砂层之上覆盖厚度 30 m 以上的黄土, 黄土颜色淡棕红。

T6: 基座阶地, 拔河高度约 170 m, 砾石层的厚度在 12 m 以上, 最大厚度可达 26 m。砾石的粒径以 2~ 18 cm 为主, 磨圆很好, 以极圆和圆为主, 扁平砾石具有一定的倾向, 一般倾向北, 即现代黄河的上游。砾石层上覆红粘土层, 厚度约 18 m 左右, 红土以上为厚度 30 m 以上的黄土, 古土壤序列不明显。根据上覆红土判断, 该级阶地为晚第三纪阶地。

T7: 基座阶地, 拔河高度约 200 m。砾石层的厚度 4~ 5 m 左右, 可以分为上下两层, 上层以小于 5 cm 的砾石为主, 形成明显的小砾石组成的砾石斜层

理; 下层砾石分选不好, 灰岩砾石粒径以小于 10 cm 为主, 砂岩砾石最大粒径可达 50 cm 以上。砾石的磨圆好, 以圆和极圆为主。砾石层之上为粉、细砂层夹河流相淤泥层, 厚度约 53 m 左右。该层之上堆积红粘土层, 与粉、细砂层整合接触。红粘土顶部静乐组红土与保德组红土的界限明显。红粘土之上不整合覆盖黄土。

2 晚第三纪砾石层的归属

笔者以黑峪口地区为基础, 对保德、黑峪口和克虎阶地上砾石的岩性和粒径进行了统计, 并对统计结果进行了对比。

2.1 黑峪口地区不同阶地上砾石岩性的对比

在黑峪口地区统计了 5 个点的砾石的岩性, 其中包括黄河现代河漫滩、T3、两级晚第三纪阶地 T6 和 T7 以及一级拔河高度为 50 m 的蔚汾河阶地。在每级阶地上都统计了 160~ 190 块砾石的岩性。

砾石统计结果如图 3, 黄河现代河漫滩与其他四级阶地上砂岩砾石的比例都很高, 为 40% 左右。两级晚第三纪阶地 T6 和 T7 与现代黄河河漫滩和黄河 T3 上砾石的岩性保持了很好的相似性, 而 T6 和 T7 与蔚汾河阶地上的砾石岩性差别较大, 表现在蔚汾河阶地灰岩砾石的比例异常减小, 不到 15%, 而黄河现代河漫滩、T3、T6 以及 T7 灰岩砾石的比例都在 40% 以上; 蔚汾河阶地上其他岩性的砾石如变质岩、火成岩等成分异常升高, 近 30%, 与黄河阶地形成鲜明对比。在野外的观察中发现, 蔚汾河阶地上砾石的磨圆比其他阶地上砾石的磨圆要差, 而两级晚第三纪阶地的砾石磨圆明显要好。因此, 晚第三

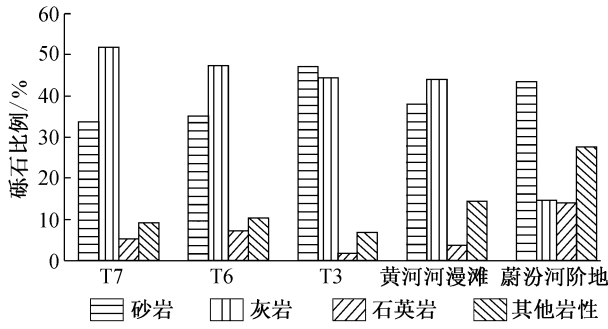


图 3 黑峪口地区阶地砾石岩性对比

Fig 3 Comparison of pebbles lithology on different terraces in Heiyukou area

纪阶地应该属于南北向古水系作用形成的阶地, 不赞成把其归为东西向水系所形成。

2.1.2 砾石岩性的空间变化

除了对黑峪口地区五级阶地进行了砾石统计之外, 我们还分别在黑峪口上游的保德和下游的克虎统计了砾石的岩性, 保德地区统计了 T5、T6 和 T7, 克虎地区 T5 和 T7 砾石出露不好, 仅统计了 T6 砾石的岩性。把它们分别与黑峪口所对应的阶地进行了对比。

图 4 给出了对比的结果。可以看出, 保德地区

T5、T6 和 T7 三级阶地上都以灰岩砾石占绝对优势, 灰岩砾石的比重达到 70% 以上, 造成这种相对单一岩性原因, 一方面是保德以北, 黄河主要切割于灰岩和含煤页岩之中, 灰岩物源比较近; 另一方面, 该区泥岩和页岩容易破碎, 很难保存下来, 而硬度较大的灰岩则保存下来, 成为阶地砾石的主要成分。至黑峪口, 砂岩砾石比例明显增大, 已经超过 30%, 阶地上灰岩砾石和砂岩砾石的比重已经相差不多。至下游的克虎镇, T6 阶地砂岩砾石的比例达到 50% 以上, 为阶地上占主导成分的砾石, 灰岩砾石的比例不足 30%, 退居次要地位。从保德至克虎灰岩砾石和砂岩砾石主导地位的更替, 正是物源变化的一种反映。

2.1.3 灰岩砾石粒径的空间变化

物源的变化不仅表现在从上游向下游灰岩数量的减少, 在灰岩砾石粒径上也得到了反映。对保德、黑峪口和克虎阶地上粒径大于 1 cm 的砾石进行了统计, 并把其中灰岩砾石粒径的区间分布单独列出, 结果如表 1。保德阶地上灰岩砾石的粒径在各个区间都有分布, 向下游至黑峪口, 灰岩砾石粒径明显变小, 到克虎灰岩砾石的粒径主要集中于 1~5 cm 左右。这种砾石粒径的变化反映了随着物源的渐远,

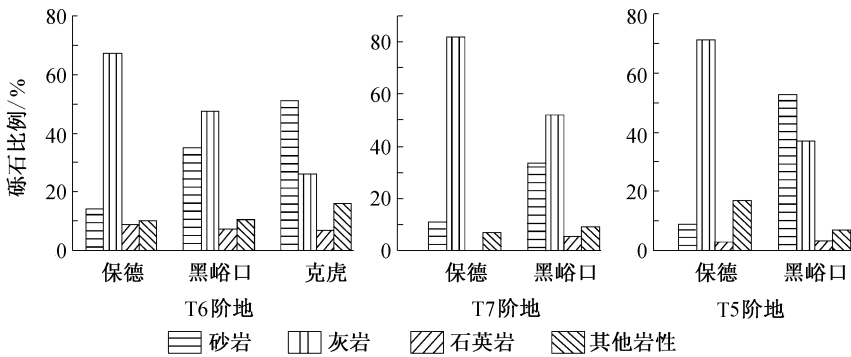


图 4 保德至克虎阶地砾石岩性沿河变化

Fig 4 The change of pebbles lithology from the upstream Baode to the downstream Kehu

表 1 T6 和 T7 阶地砾石粒径沿河分布

Table 1 The distribution of pebbles grain size of T6 and T7

阶地	砾石总量	粒径区间分布					
		1~3 cm	3~5 cm	5~7 cm	7~9 cm	9~11 cm	>11 cm
保德 T7	90	12	34	18	8	13	5
黑峪口 T6	100	14	34	23	15	4	10
克虎 T6	150	53	60	22	7	6	2
阶地	灰岩砾石数量	灰岩砾石粒径区间分布					
		1~3 cm	3~5 cm	5~7 cm	7~9 cm	9~11 cm	>11 cm
保德 T7	74	8	27	15	8	11	5
黑峪口 T6	33	4	21	6	1	0	1
克虎 T6	41	20	18	2	1	0	0

一方面大粒径灰岩砾石不易搬运而沉积下来,另一方面砾石随着搬运距离的增大,在搬运途中遭受磨损或侵蚀而使粒径变小。

综合对该区砾石岩性的横向对比和纵向对比以及灰岩砾石粒径的分析,我们认为该区晚第三纪河流相砾石层并非东西向水系所形成,而是由北向向南流的古水系作用的产物。

3 两级晚第三纪阶地形成的年代

对黑峪口黄河 T6 进行详细的野外调查发现,阶地上红土的厚度普遍在 18 m 左右,可见五层深红色古土壤层,其间是钙结核和浅红色红土,以第二层古土壤厚度最大,颜色最红,第四层古土壤之下厚度约 4 m 浅色红土中,钙结核密布,没有成层现象,第五层古土壤下没有钙结核分布,为河流相的砂砾石层。T7 阶地之上发育 70 m 以上的粉砂、细砂层和红粘土层,粉砂、细砂层中可见弱古土壤、钙结核层和河流相淤泥层,可能是风和流水共同作用所形成的,保德组红土的厚度约 11 m,发育了 11 条钙结核层,静乐组红土的上部因黄土覆盖出露不完整,仅可见 4 条钙结核层。

我们对 T6 上覆红粘土按 20~40 cm 的间隔采

集了古地磁样品,对 T7 上覆地层以 40~50 cm 的间隔采集了古地磁样品,顶部钙结核密集处间隔相应加宽,加工成边长为 2 cm 的立方体,共获得古地磁定向样品 175 块。样品在中国地质科学院地质力学研究所古地磁实验室进行测试,退磁采用 TD-48 型热退磁炉,剩磁测量在 2G-755 型超导磁力仪上完成。T6 阶地上的样品从室温一直加热到 680 e,进行了 16 步系统热退磁。由于绝大多数样品在退磁温度为 250~350 e 时次生剩磁基本得到清洗,原生剩磁开始出现,因此对 T7 的样品从室温加热到 580 e,共 12 步热退磁。部分样品的退磁结果如图 5 所示。

我们把古地磁测量结果与 Cande 等^[13]的标准极性柱进行了对比,T6 阶地剖面的对比结果如图 6 所示,红粘土第一层古土壤的底部以下近 9 m 的红粘土都是正极性时,基于野外地层和临近地区^[14,15]风成红粘土研究成果的对比,该段应对应于高斯极性时的首段,即标准极性柱的 2 An. 1n。约从 1317~1514 m 为负极性,对应于标准极性柱的 2 An11r,为 Kaena 负极性事件。1514~1717 m 为正极性时,对应于标准极性柱的 2 An. 2n,最后一段负极性对应 2 An. 2r 段,为 Mammoth 负极性事件,但并没有到达该

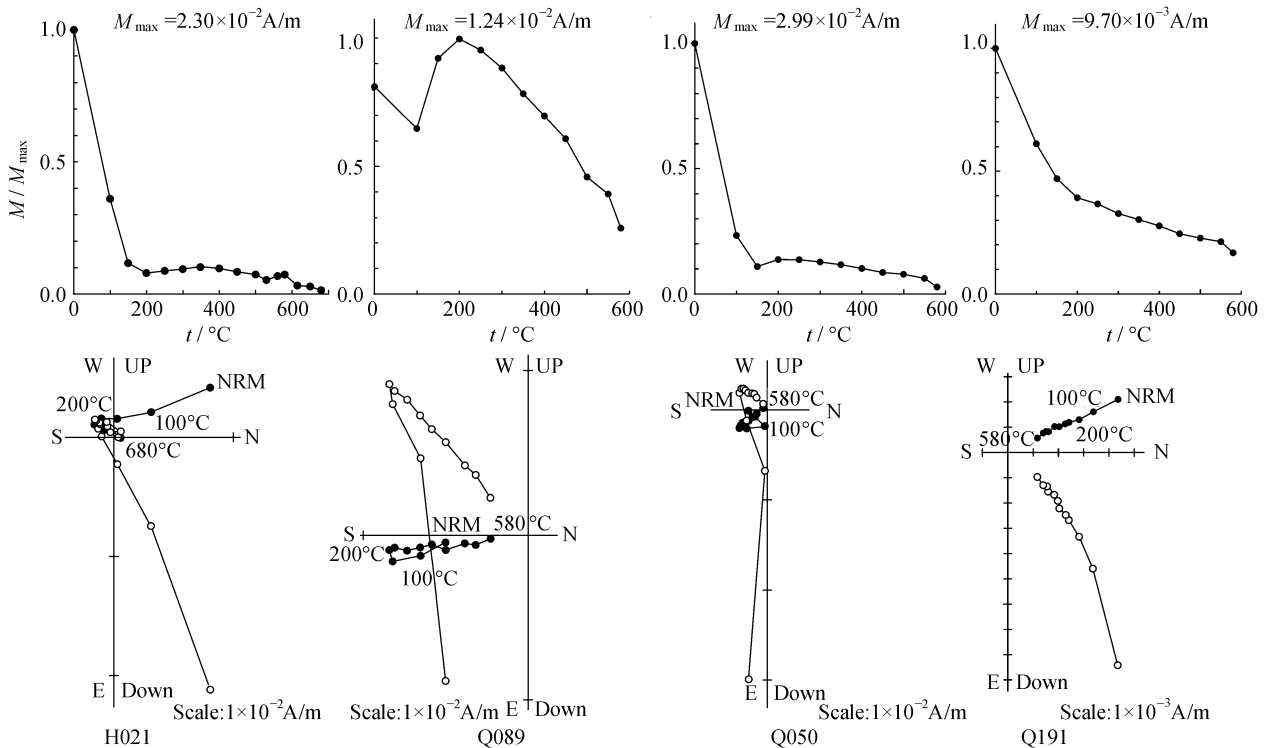


图 5 T6 和 T7 阶地上覆地层典型样品退磁曲线

Fig 5 Typical demagnetization curves of capped strata on T6 and T7

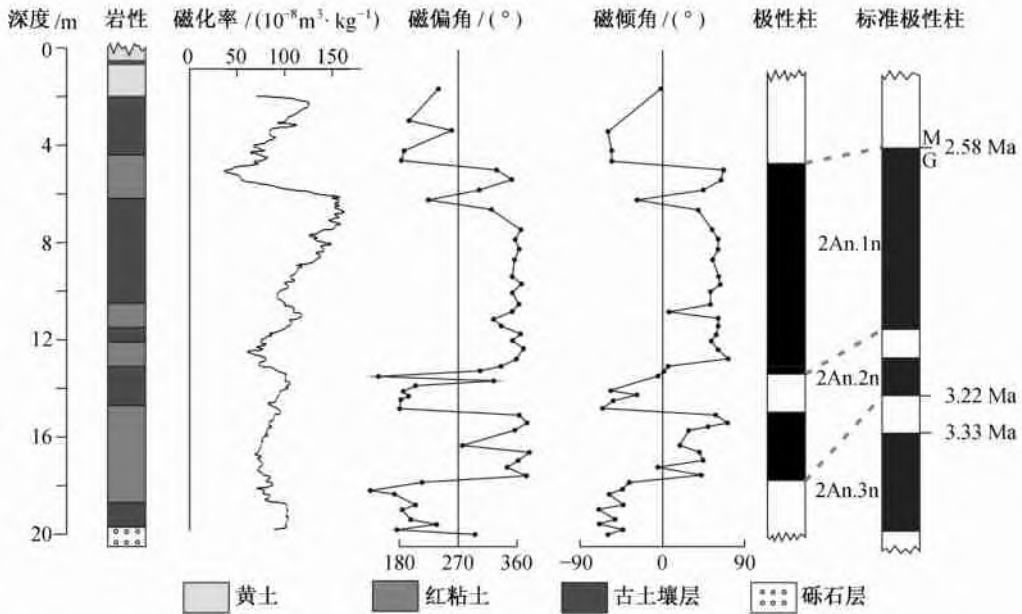


图 6 T6 阶地上覆红粘土地层磁化率和古地磁测量结果

Fig 6 Lithology, magnetic susceptibility and magnetostratigraphy of capped redclay stratum on T6

段的底部。根据该红粘土剖面底部的沉积速率推算, 该剖面底部的年龄约在 313 Ma 左右。由于该剖面底部存在厚度 0.5 m 的红粘土和砂的混杂层, 推断该阶地形成时就开始接受红粘土沉积, 即阶地的形成时代也在 313 Ma 左右。

磁化率的研究结果也表明, 在 313 Ma 左右和 218 Ma 左右是磁化率的峰值区, 特别是 218 Ma 磁化率达到最高值, 反映了上新世重要的夏季风气候适宜期, 与灵台剖面^[16]和西峰剖面^[17]等都可以很好对比。磁化率曲线与黄土高原其他地区 313 Ma 以来的曲线对比完美, 从侧面说明古地磁对比结果是可靠的。

保德组地层中含有丰富的化石, 如 *Chilotherium habereri* (哈氏大唇犀)、*Acerorhinus hezhengensis* (和政无角犀)、*Dinocrocuta gigantea* (巨鬣狗)、*Hipparion* (三趾马)、*Honanotheri sp.* (河南兽)等^[18], 而静乐组红土中动物化石较少, 典型哺乳动物化石的有 *Hipparion houfense* (贺风三趾马)、*Gazella blacki* (布氏羚羊)等^[19]。磁性地层的研究表明, 静乐组红土和保德组红土的界限在 51.23 Ma 左右^[15, 19], 对应标准极性柱 C3n. 4n 底部的年代。T7 阶地上覆静乐组红土和保德组红土的界限明显, 我们的采样也跨越了该界限, 作为古地磁对比的依据。T7 上覆地层的古地磁测量结果如图 7 所示, 剖面中厚约 11 m 的保德组粘土中存在二负一正共三个极性段, 自上而下分别对应

着标准极性柱的 3r、3An. 1n 和 3An. 1r。保德红土下部厚约 53 m 的粉、细砂层有两个极性段, 上部厚度约 28 m 是正极性, 对应着 3An. 2n, 沉积速率约 1 m/10 ka, 下部厚约 25 m 为负极性, 对应于标准极性柱的 3Ar, 如果按照粉、细砂层上部的沉积速率推算, 该层底部形成的年代应该在 618 Ma 前, 即由北向南流的古水系至少在 618 Ma 之前已经在山陕峡谷北部存在了。由于 T7 上覆地层在 618 Ma 以后仍然快速沉积粉、细砂夹河流相淤泥, 推测粉、细砂堆积结束红土开始出现的年代为 T7 形成的年代, T7 下切的年代约在 61.27 Ma 左右。

4 讨论与结论

阶地砾石岩性和粒径对比的结果表明, 该区两级晚第三纪阶地为南北向河流作用的产物, T7 和 T6 两级阶地的年龄分别是 61.27 Ma 和 313 Ma, 说明了由北向南流的古水系至少在中新世晚期已经出现在山陕峡谷北部了。如果该古水系是当时的古黄河, 那么黄河的形成时代至少推到 618 Ma 之前。

河流阶地的成因可归结为构造运动、气候变化和侵蚀基准面的升降等。青藏高原在 316 Ma 左右发生强烈抬升, 被称为青藏运动 A 幕, 对其周边地区产生了重大影响^[11, 14, 20, 21]。黑峪口 T6 阶地在 313 Ma 前形成, 可能是青藏运动 A 幕强烈隆升在该区的反映。同时, T6 阶地形成时正是上新世最重要的

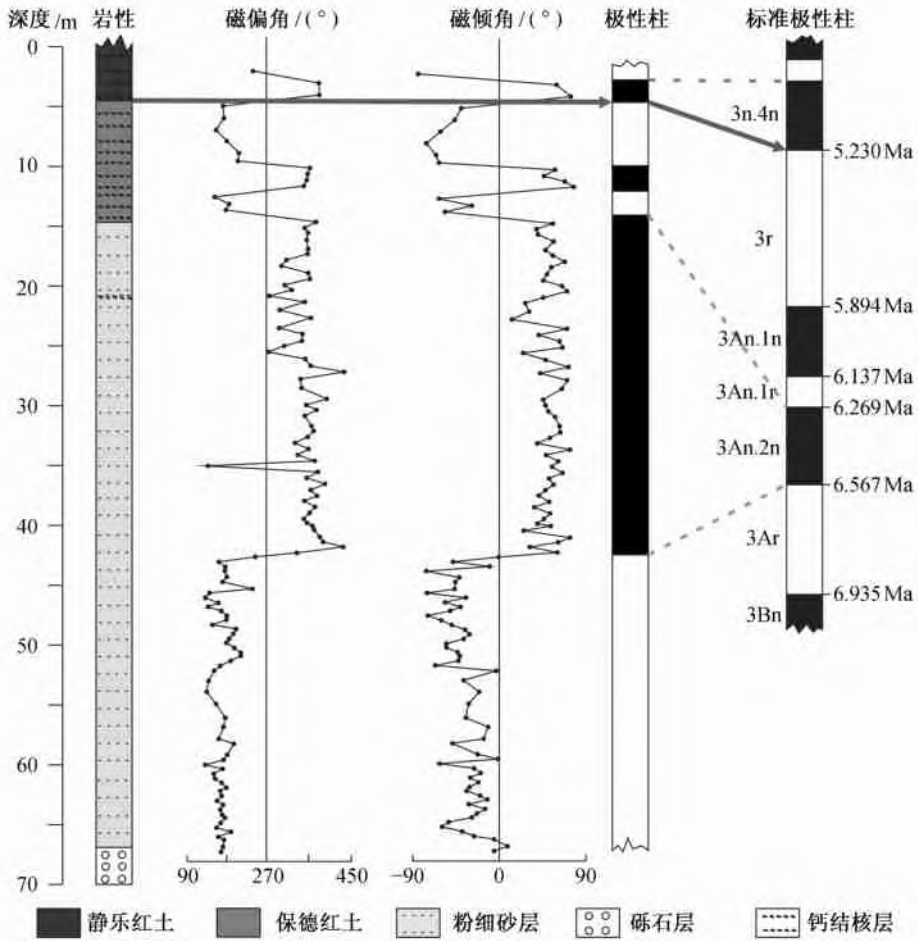


图 7 T7 阶地上覆地层剖面岩性与古地磁测量结果

Fig 7 Lithology and magnetostratigraphy of capped stratum on T7

气候适宜期, 因此 T6 阶地的形成也可能叠加了气候方面的因素。关于 T7 阶地, 除李吉均报道过祁连山在 615 Ma 明显升高外^[20], 尚没有发现大规模的构造运动与该级阶地相对应, 对 T7 阶地的成因还有待继续研究。

从黄河西岸 T7 到东岸 T6 之间的距离可达 8 km 以上, 两级阶地的高差为 35 m 左右, 平均下切速率约 10 mm/ka, 说明从 618 Ma 至 313 Ma 之间, 河流主要以侧蚀拓宽为主, 而 313 Ma 以来, 黄河下切了 160 m, 平均下切速率为 50 mm/ka, 约是前者的 5 倍以上, 形成了五级阶地和壮观的山陕峡谷, 是青藏运动 A 幕以来该区构造隆升加速的一种反映。

最老的砾石层在 618 Ma 之前已经出现在山陕峡谷, 青藏高原的研究表明, 8 Ma 左右青藏高原东北缘普遍存在强烈的构造运动^[22], 海原-六盘山断裂活动使鄂尔多斯夷平面瓦解, 六盘山也开始隆起^[23], 黄土高原红粘土最早沉积的年代也在 8 Ma 左右^[14, 23], 山陕峡谷北部由北向南流的古河流的产生

与这次构造运动是否存在一定的关系? 需要进一步研究。

致谢 感谢中国地质科学院地质力学研究所杨振宇、傅建利在样品测试期间给予的帮助。参加野外工作的还有张家富、胡钢等。

参 考 文 献

- [1] 德日进, 杨钟健. 山西西部陕西北部蓬蒂纪后黄土期前之地层观察. 地质专报, 1930, 甲种, 第 8 号: 1-19.
- [2] 王乃樑. 对于张伯声先生/从黄土线说明黄河河道的发育一文之意见. 科学通报, 1956, 7: 67-72.
- [3] 袁宝印, 王振海. 青藏高原隆起与黄河地文期. 第四纪研究, 1995, 4: 353-357.
- [4] Lin A M, Yang Z Y, Sun Z M, et al. How and when did the Yellow River develop its square bend. Geology, 2001, 29 (10): 951-954.
- [5] Li R Q, Yang M C. Relationship between development of the Huanghe and Yongdinghe rivers and the evolution of the

- fossil lakes of the Cenozoic era in the drainage area. Chinese Geographical Science, 1991, 1(3): 234-247.
- [6] 朱照宇. 黄河中游河流阶地的形成与水系演化. 地理学报, 1989, 44(4): 429-439.
- [7] 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.
- [8] 岳乐平, 雷祥义, 屈红军. 黄河中游水系的阶地发育时代. 地质论评, 1997, 43(2): 185-192.
- [9] 潘保田, 李吉均, 曹继秀. 黄河中游的地貌与地文期问题. 兰州大学学报(自然科学版), 1994, 30(1): 115-123.
- [10] 潘保田, 王均平, 高红山, 等. 河南扣马黄河最高级阶地古地磁年代及其对黄河贯通时代的指示. 科学通报, 2005, 50(3): 255-261.
- [11] Li J J, Fang X M, Ma H Z, et al. Geomorphological and environmental evolution in the upper reaches of the Yellow River during the late Cenozoic. Science in China (Series D), 1996, 39(4): 380-390.
- [12] 张抗. 黄河中游形成史初探. 中国第四纪研究, 1988, 8(1): 185-193.
- [13] Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B4): 6093-6095.
- [14] Qiang X K, Li Z X, Powell C M, et al. Magnetostratigraphic record of the Late Miocene onset of the East Asian monsoon, and Pliocene uplift of northern Tibet. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 187: 83-93.
- [15] 岳乐平, 邓涛, 张云翔, 等. 保德阶层型剖面磁性地层学研究. 地层学杂志, 2004, 28(1): 48-51.
- [16] 丁仲礼, 孙继敏, 杨石岭, 等. 灵台黄土-红粘土序列的磁性地层及粒度记录. 第四纪研究, 1998, 1: 86-94.
- [17] 孙东怀, 陈明扬, John Shaw, 等. 晚新生代黄土高原风尘堆积序列的磁性地层年代与古气候记录. 中国科学(D辑), 1998, 28(1): 79-84.
- [18] 薛祥煦, 张云翔, 岳乐平. 陕西府谷老高川三趾马动物群的发现及时代划分. 科学通报, 1995, 40(5): 447-449.
- [19] 张云翔, 薛祥煦, 岳乐平. 陕西府谷老高川新第三纪/红层0的划分与时代. 地层学杂志, 1995, 19(3): 214-219.
- [20] 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.
- [21] An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times. Nature, 2001, 411: 62-66.
- [22] 张培震, 郑德文, 尹功名, 等. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论. 第四纪研究, 2006, 26(1): 5-13.
- [23] 宋友桂, 方小敏, 李吉均, 等. 六盘山东麓朝那剖面红粘土年代及其构造意义. 第四纪研究, 2000, 20(5): 457-463.