

# 青海循化盆地晚更新世沉积序列与古气候

韩芳<sup>1,2</sup>, 张克信<sup>1,2,3\*</sup>, 韦一<sup>2</sup>, 季军良<sup>1,2</sup>, 徐亚东<sup>1,2</sup>, 陈奋宁<sup>4</sup>, 寇晓虎<sup>1,3</sup>

1. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074

4. 西安地质矿产研究所, 陕西西安 710054

**摘要:** 河流阶地作为河谷中常见地貌, 其堆积物特征对气候变化过程研究具有重要的意义。通过对循化黄河Ⅲ级阶地剖面沉积特征、粒度、磁化率、孢粉以及光释光测年的研究, 初步厘定循化黄河Ⅲ级阶地形成时代为 75 ka。循化盆地晚更新世气候演化可以大致划分为 6 个阶段: 120~114 ka, 气候暖湿; 114~105 ka, 气候较为干冷; 105~98 ka, 气候较暖湿; 98~85 ka, 气候转为温凉; 85~75 ka, 气候暖湿; 75~63 ka, 气候干冷。这 6 个阶段分别与 MIS5e-4 段相对应。

**关键词:** 河流阶地; 粒度; 磁化率; 环境演变; 循化盆地。

中图分类号: Q913

文章编号: 1000-2383(2010)05-0849-08

收稿日期: 2010-05-31

## Sedimentary Sequences and Paleoclimate of Late Pleistocene in Xunhua Basin, Qinghai Province

HAN Fang<sup>1,2</sup>, ZHANG Ke-xin<sup>1,2,3\*</sup>, WEI Yi<sup>2</sup>, JI Jun-liang<sup>1,2</sup>, XU Ya-dong<sup>1,2</sup>, CHEN Fen-ning<sup>4</sup>, KOU Xiao-hu<sup>1,3</sup>

1. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Geological Survey of China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China

**Abstract:** Sedimentological analyses of the third terrace along the banks of the Yellow River in Xunhua basin have yielded results that have more than regional significance. They are concerned with the reaction of rivers to climatic changes in the Pleistocene. Based on the field investigations, granularity, magnetic susceptibility, palynological records and optically stimulated luminescence (OSL) dating, the age of the third terrace was revealed. It shows that the Yellow River incised during the transition from interglacial to glacial. Evidences show that the paleoclimate and environment in Xunhua basin during the Late Pleistocene can be roughly divided into six stages: (1) 120–114 ka, the climate was warm and moist; (2) 114–105 ka, the climate turned cool and dry; (3) 105–98 ka, the climate was relatively warm and humid; (4) 98–85 ka, the climate turned cool and temperate; (5) 85–75 ka, the climate was warm and humid; (6) 75–63 ka, the climate was cold and dry, which can be compared with high-resolution ice core and marine oxygen isotope climate series.

**Key words:** river terrace; granularity; magnetic susceptibility; environment evolution; Xunhua basin.

大量研究表明在地壳稳定抬升的地区, 河流沉积物的成分和结构特征与气候波动有明显的关系 (Vandenbergh, 1993, 1995; Blum, 1994; Bridgeland and Maddy, 1995; 李有利和杨景春, 1997)。相

对于深海沉积、冰心和黄土, 各种河流过程及沉积物更能显著地反映局部地区的气候环境变化, 因此河流体系是研究区域气候环境变化的理想对象 (常宏等, 2005)。但是, 河流沉积物的沉积动力、沉积速度、

基金项目: 中国地质调查局项目 (No. 1212010610103); 国家自然科学基金项目 (Nos. 40921062, 40830212); 国家地质学理科基地人才培养基金 (No. J0830520)。

作者简介: 韩芳 (1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事微生物古生物学及生态学研究。E-mail: smilehf912@163.com

\* 通讯作者: 张克信, E-mail: kx\_zhang@cug.edu.cn

沉积时间与黄土沉积和湖泊沉积有很大不同. 磁化率、粒度参数在河流沉积物中指示的环境意义也不尽相同. 不同学者对粒度参数的环境指示意义有不同的看法(Maddy *et al.*, 2001; 杨小强和李华梅, 2002; Nador *et al.*, 2003). 对于河流沉积物中磁化率值的变化与气候之间的关系, 有以下几种看法: 高的磁化率值出现在砂和粗粉砂沉积物中, 气候比较温暖, 低的磁化率值出现在粉砂和粘土沉积物中, 气候比较寒冷(夏凯生等, 2007); 磁化率的低值对应着较粗的沉积物颗粒和温暖的气候环境, 并且磁化率的大小取决于每次沉积时的洪水动力大小(周晓红和赵景波, 2007); 沉积物磁化率值的高低与粒级组分和相应的气候状况在不同河流中的对应并不一致, 磁化率在一定程度上可以作为水动力能量的代用指标, 但并不能直接反映气候的变化(吉云平和夏正楷, 2007). 本文试图通过对循化盆地内出露较好的黄河Ⅲ级阶地进行详细野外观测和沉积特征分析, 以及对光释光(OSL)测年、磁化率、粒度和孢粉的分析, 确定Ⅲ级阶地的形成时间, 探讨Ⅲ级阶地形成时期循化地区的气候—环境变化以及磁化率、粒度在河流沉积物中的环境指示作用.

### 1 剖面位置及采样、实验方法

循化盆地位于青海省东部循化县、尖扎县一带, 盆地大致呈北西向展布, 为新生代压陷盆地(张克信等, 2010)(图 1). 黄河自扎马杂日山的阿什贡峡(长 6.4 km)和松巴峡(长 4.6 km)流出后, 进入群尖盆地, 然后在尖扎县城以东切开公伯峡(长 5.4 km)流入循化盆地(潘保田等, 1996; 岳乐平等, 1997), 并在循化盆地发育有 5 级阶地. 本文所测Ⅲ级阶地(35°50'6"N、102°30'10"E)位于循化县积石镇羊圈拜贡沟的沟口, 阶地出露较好, 总厚度约 25 m. 以 15 cm 的平均间距分别采集磁化率、粒度以及孢粉样品各 173 个, 并在阶地下部、中部及顶部的细粒沉积物中采集了 5 个 OSL 样品.

磁化率样品的测量是在中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院实验室完成的. 测量仪为英国 Bartington 公司生产的 Bartington MS2 型磁化率仪, 为了保证测试的精确性, 每个样品的磁化率均进行了 3 次测试, 然后取平均值.

粒度样品的测量是在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质教育部重点实验室完成. 测量仪为

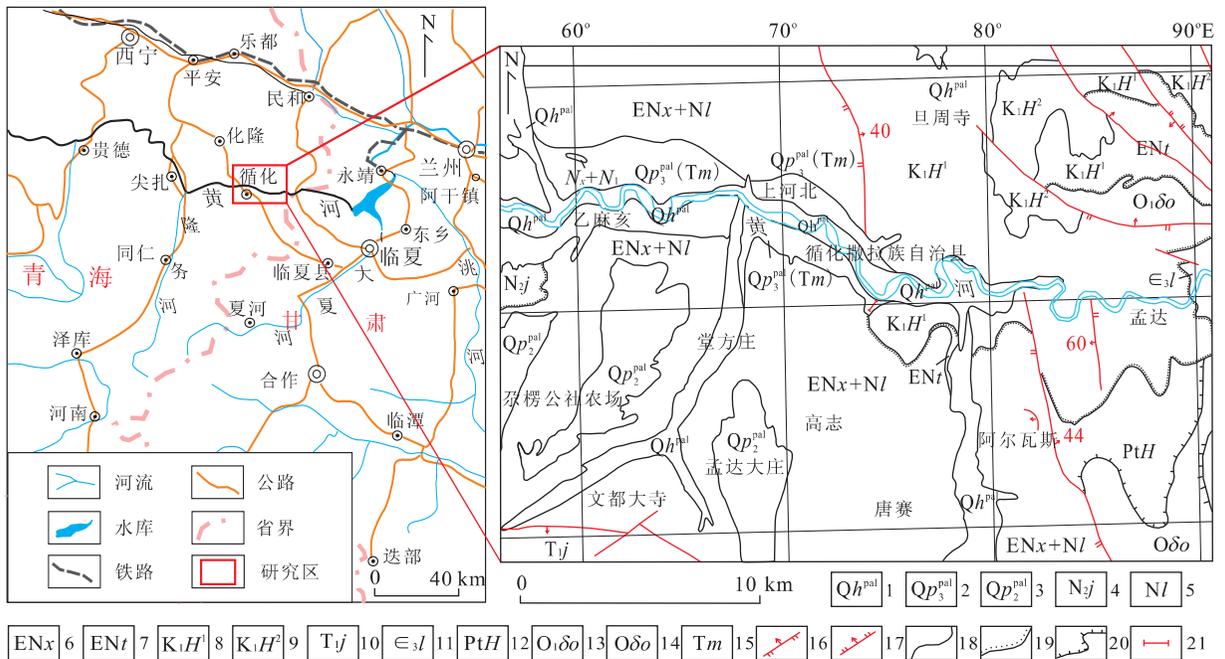


图 1 研究区交通位置及地质简图(据中国地质大学地质调查研究院(2006) 修改<sup>①</sup>)

Fig. 1 The traffic location and geological map of the study area

1. 全新统; 2. 上更新统; 3. 中更新统; 4. 上新统积石组; 5. 中上新统临夏组; 6. 渐—中新统咸水河组; 7. 渐—中新统他拉组; 8. 下白垩统河口群一组; 9. 下白垩统河口群二组; 10. 下三叠统江里沟组; 11. 上寒武系六道沟组; 12. 元古界化隆岩群; 13. 早奥陶世灰绿色中粒石英闪长岩; 14. 奥陶纪灰绿色石英闪长岩; 15. 三级阶地; 16. 逆断层; 17. 正断层; 18. 实测地质界线; 19. 实测角度不整合界限; 20. 侵入界限; 21. 剖面位置

<sup>①</sup>中国地质大学地质调查研究院, 2006. 甘肃 1 : 25 万临夏市幅(I48C001001)、定西县幅(I48C001002)区域地质调查报告, 武汉.

美国贝克曼库尔特公司 LS230 型激光粒度分析仪, 测量范围为  $0.04 \sim 2000 \mu\text{m}$ 。

孢粉样品的处理在中国地质大学(武汉)微体古生物实验室完成。

OSL 样品的测试由石家庄国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心检测完成。测试所用仪器为美国 Daybreak1100 型光释光仪, 采用的方法为细颗粒( $4 \sim 11 \mu\text{m}$ )简单多测片再生剂量法(SAR)。

## 2 循化黄河 III 级阶地的沉积特征和年龄结果

### 2.1 III 级阶地沉积特征

循化黄河 III 级阶地剖面野外共划分出 58 层, 根据岩性特征进一步归并为 7 段。这 7 段地层的岩性特征自上而下描述如下(图 2):

- ⑦紫红色次生黄土层, 土质均匀, 中值粒径大致变化在  $10 \sim 30 \mu\text{m}$ , 层理不明显, 与同时代沉积的乌兰黄土相对应。 7.28 m
- ⑥紫红色中薄层砂砾石与灰绿色中层状砂、桔红色中薄层粉砂不等厚互层, 共组成 88 个旋回。紫红色砂砾石层在剖面上呈透镜状, 砾石分选性较差, 磨圆度一般。砾石成分以砂岩为主直径一般在  $2 \sim 5 \text{ mm}$  左右, 自下而上, 砾石直径逐渐增大。砂泥质充填, 发育叠瓦状构造, 砾石扁平面产状  $160^\circ \angle 20^\circ$ 。局部砂砾石层中可见楔状、板状交错层理。粗砂中可见平行层理, 粉砂质泥岩中可见水平层理, 为边滩沉积。 9.43 m
- ⑤桔红色钙质泥与灰绿色薄层粉砂互层组成 13 个旋回。桔红色泥中可见水平层理, 为天然堤沉积。 0.56 m
- ④红褐色、桔红色砂、粉砂与灰绿色、灰红色泥不等厚互层, 组成 69 个旋回, 部分旋回底部夹红褐色砂砾石层。本段粒径变幅较大, 具典型的正粒序层理。红褐色砂砾石层在剖面上呈透镜状或夹层状, 砾石磨圆一般, 分选较差, 大小混杂, 砂岩为主, 含少量泥砾, 砂泥质充填, 发育叠瓦状构造, 砾石扁平面产状  $135^\circ \angle 25^\circ$ 。桔红色粉砂中发育水平层理, 部分旋回的灰红色泥层中可见泥裂, 为边滩沉积。 5.37 m
- ③灰白色粉砂、泥质粉砂与灰红色泥互层为主, 局部可见砂质透镜体。该段地层自下而上, 大致可划分出 6 个粗、细相间的韵律层。粉砂内普遍发育爬升层理、缓状斜层理, 泥岩层中可见平行层理, 为天然堤沉积。 2.04 m
- ②灰白色石英细砂, 向上过渡为灰白色石英中、粗砂。灰白色石英中、粗砂分选一般或不好, 含小角砾, 可见平行层理以及小型楔状、波状交错层理, 为边滩沉积。 0.5 m
- ①灰白色砂砾石层、巨砾层。砾石磨圆、分选均较好, 成

分以砂岩为主, 花岗岩、火山岩次之, 粒径多在  $4 \sim 6 \text{ cm}$ , 砂质充填, 松散。砾石扁平面产状  $250^\circ \angle 20^\circ$ , 与现今黄河河床砾石一致, 为河道砾石层。 3.01 m

### 2.2 III 级阶地 OSL 年龄

循化黄河 III 级阶地光释光的测年结果见表 1。剖面顶部次生黄土(样品 S21-57-1)的光释光年龄为  $62.8 \pm 3.6 \text{ ka}$ , 推测 III 级阶地的阶地面脱离河漫滩环境接受风成沉积的年龄, 即阶地的形成年龄为 75 ka。这与前人根据黄土—古土壤序列测得的兰州黄河 III 级阶地形成于约 13 万年前的认识不一致(岳乐平等, 1997; 潘保田等, 2006, 2007)但与王萍等(2008)在兰州范家坪、赵振明和刘百麓(2003)在循化根据光释光和热释光所测的黄河 III 级阶地形成时间一致。

## 3 III 级阶地堆积过程及循化盆地晚更新世气候变化

### 3.1 III 级阶地堆积过程

III 级阶地的形成可分为 3 个阶段, 第 1 阶段是河床沉积物形成时期。III 级阶地河床砂的光释光年龄为  $113.6 \pm 8.4 \text{ ka}$ , 为末次间冰期。古里雅冰心记录 MIS5e 时期气温比现在高  $5^\circ\text{C}$ (姚檀栋等, 1997), 气候温暖湿润, 降雨量大, 河水径流量大, 在不断的冲刷与分选作用下, 细粒物质(粉砂、粘土)被带走, 在河床上留下分选和磨圆都较好的砾石层, 该阶段黄河的古流向为北东东方向(图 2)。由于该时期气候暖湿, 植被发育, 导致河曲发育, 河道迁移(Kasse *et al.*, 1995)(图 3)。第 2 阶段是河流的侧向侵蚀和侧向加积期。由于河床在河谷中的摆动, 河曲继续生长、移动, 该阶段黄河的古流向转为北北西方向(图 2), 河流在凹岸侵蚀, 凸岸沉积(图 3), 河床沉积物以砂砾石为主, 分选磨圆度均较差。Vandenberghé (1993, 1995)的研究表明在冷暖气候过渡阶段, 由于河流系统自身的不稳定性, 河流更易发生下切, 在末次间冰期—末次冰期的过渡时期, 黄河迅速下切形成 III 级阶地面(Antoine *et al.*, 2000)。第 3 阶段为连续的风成黄土沉积, 河漫滩高出洪水位形成阶地后, 风成黄土就开始在阶地面上稳定堆积(潘保田等, 2007)。

### 3.2 循化盆地的环境演化阶段与对比

根据磁化率、粒度参数结合少量的孢粉分析结果, 将循化盆地晚更新世环境演化分为大致 6 个阶段(图 4)。

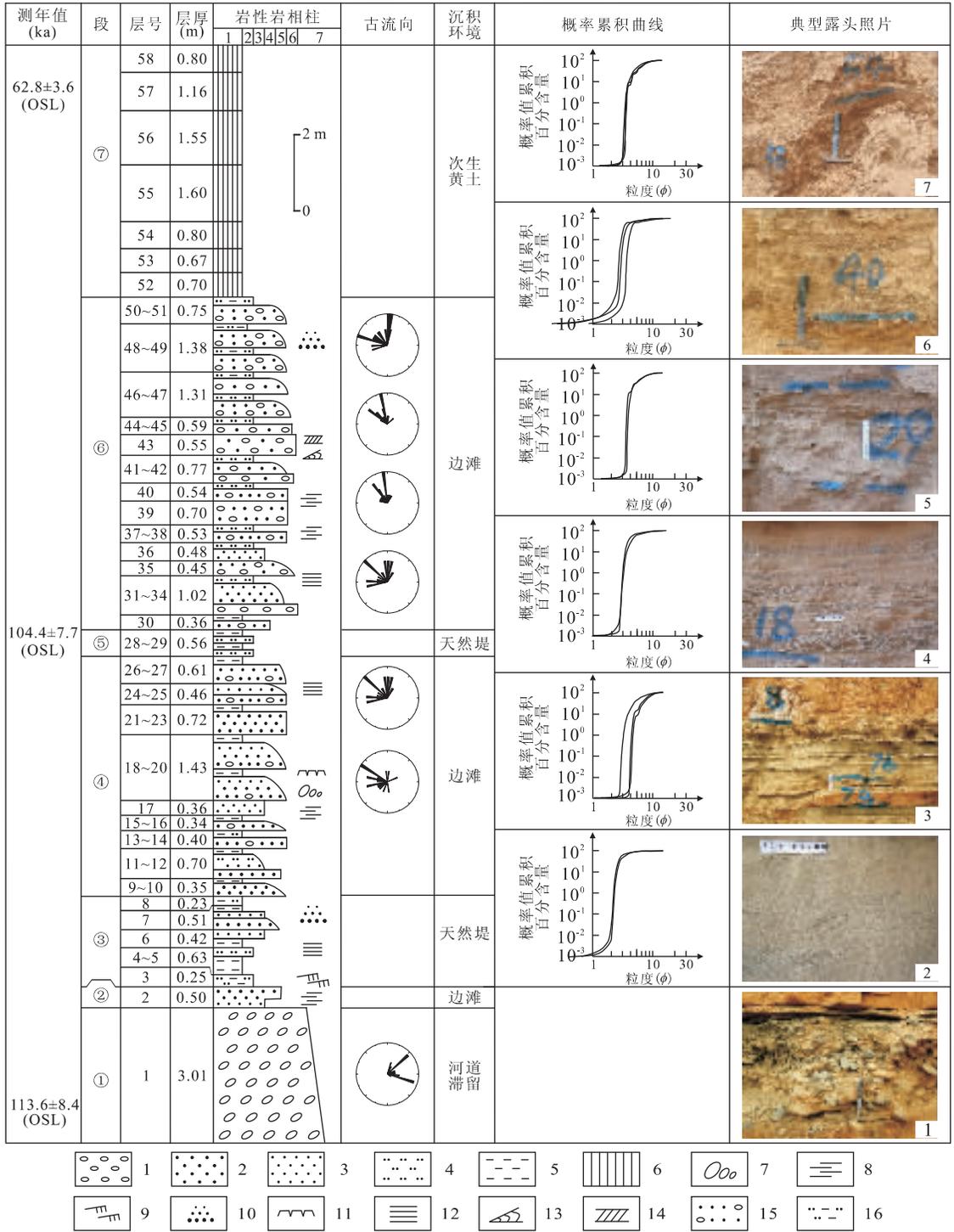


图 2 青海循化盆地Ⅲ级阶地剖面综合柱状图

Fig. 2 Stratigraphic profile of the third terrace in Xuhua basin, Qinghai Province

岩性岩相柱中: 1. 泥, 2. 粉砂, 3. 细砂, 4. 中砂, 5. 粗砂, 6. 细砾, 7. 巨砾; 典型露头照片: 1. Ⅲ级阶地⑦层河床滞留沉积, 砾石具叠瓦状构造; 2. Ⅲ级阶地⑥层曲流沙坝沉积, 发育波状交错层理; 3. Ⅲ级阶地⑤层天然堤沉积, 砂泥互层, 发育水平层理; 4. Ⅲ级阶地④层曲流沙坝沉积, 多个正粒序旋回组成, 发育平行层理、泥裂; 5. Ⅲ级阶地③层天然堤沉积, 砂泥互层; 6. Ⅲ级阶地②层曲流沙坝沉积, 正粒序旋回组成, 砾石含量较多, 砾石具叠瓦状构造, 发育水平层理; 7. Ⅲ级阶地①层次生黄土沉积, 块状; 图例: 1. 砾岩, 2. 粗砂岩, 3. 细砂岩, 4. 粉砂岩, 5. 泥岩, 6. 黄土, 7. 叠瓦状构造, 8. 平行层理, 9. 爬升层理, 10. 正粒序层理, 11. 泥裂, 12. 水平层理, 13. 楔状交错层理, 14. 板状交错层理, 15. 含砾砂岩, 16. 泥质粉砂

阶段I(28. 185~22. 635 m, 120~113 ka): 除去 该段最底部砂砾石层未做磁化率及粒度分析, 该段

表1 循化黄河Ⅲ级阶地光释光测年结果和参数

Table 1 Analytical results of OSL and their parameters of sediments from the third terrace of the Yellow River in Xunhua basin

样品编号	野外编号	U (%)	Th (%)	K (%)	等效剂量 E, D (Gy)	年剂量 $D_y$ (Gy/Ka)	年龄 (Ka)
08G-350	S21-2-1	2.71	13.60	1.40	393.73±24.63	3.48	113.6±8.4
08G-351	S21-30-3	1.88	8.09	1.59	317.81±19.86	3.04	104.4±7.7
08G-352	S21-57-1	3.12	10.20	1.94	250.75±10.42	3.99	62.8±3.6

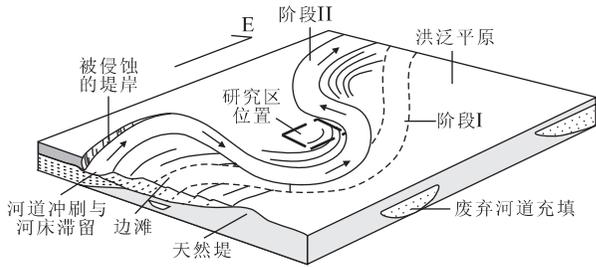


图3 研究区沉积剖面晚更新世沉积模式示意

Fig. 3 Depositional model for sedimentary section of Late Pleistocene in the study area

沉积物磁化率( $\kappa$ )和中值粒径( $M_d$ )变幅较大,底部有一显著高值,砂的百分含量约在20%~60%,说明此段河流水动力强。同时,在该阶段沉积物中可见栎属、胡桃属、桦属等阔叶乔木孢粉,说明此阶段气候以温暖湿润为主,与 MIS5e 段相对应。

阶段II(22.635~18.615 m, 113~105 ka):该阶段沉积物磁化率( $\kappa$ )和中值粒径( $M_d$ )均较低,变化幅度较小,砂的百分含量仅占20%左右,粉砂、粘土的百分含量平均大于60%,说明沉积物粒度较细,河流水动力作用不强。在该阶段沉积物中下部可见少量的云杉属、蒿属孢粉,向上出现了少量的栎属、胡桃属孢粉,说明此阶段气候总体较为干冷,存在小的波动,该阶段与 MIS5d 段相对应。

阶段III(18.615~16.345 m, 105~98 ka):该阶段沉积物的磁化率( $\kappa$ )由下至上逐渐增大,中值粒径( $M_d$ )变化幅度较大,约在50  $\mu\text{m}$ 左右,砂的百分含量变幅较大,平均占40%左右,粘土的含量较前一阶段明显减少,约为10%。这一阶段的沉积物中出现了少量栎属、胡桃属、鹅耳枥属等阔叶乔木孢粉,蒿属孢粉较前一阶段有所减少,说明此阶段气候暖湿,水动力条件较强,与 MIS5c 段相对应。

阶段IV(16.345~12.625 m, 98~87 ka):该阶段沉积物的磁化率( $\kappa$ )自下而上递减,中值粒径( $M_d$ )在30  $\mu\text{m}$ 左右,变幅较小,自下至上中值粒径有逐渐变大的趋势。砂的百分含量自下而上递增,平

均占35%左右,粘土的含量占15%左右,较前一阶段有所增加。这一阶段的沉积物中栎属孢粉含量减少,出现了少量云杉属、冷杉属孢粉,蒿属含量也有所增加,说明此阶段气候相对较温凉,水动力条件较弱,与 MIS5b 段相对应。

阶段V(12.625~7.280 m, 87~76 ka):该阶段沉积物的磁化率( $\kappa$ )较大,中值粒径( $M_d$ )约为65  $\mu\text{m}$ ,变幅较大,此段沉积物主要由砂组成,粉砂含量次之,粘土的含量10%左右。这一阶段的沉积物中未见孢粉,推测由于粒度太粗,水动力条件太强,孢粉未能保存。综上所述,推知该阶段气候相对暖湿,与 MIS5a 段相对应。

阶段VI(7.28~0 m, 76~63 ka):该阶段沉积物磁化率( $\kappa$ )和中值粒径( $M_d$ )的变化幅度很小,磁化率主要在 $20 \times 10^{-3} \sim 30 \times 10^{-3} \text{ kg}^{-1}$ 左右,中值粒径为16  $\mu\text{m}$ 左右,沉积物主要由粉砂及粘土组成,这段沉积物仅有极少量云杉属、松属孢粉,说明此阶段气候相对较干冷,与 MIS4 段相对应。

### 3.3 循化盆地黄河Ⅲ级阶地粒度和磁化率指标的环境指示意义

河流沉积物中的磁性矿物大致有3个来源:水流对河底基岩冲刷和河岸剥蚀产生的颗粒;河流流域对河流及其支流系统所提供的地表土壤侵蚀的产物;大气降水及降尘中的磁性颗粒(Thompson and Oldfield, 1986). Nador *et al.* (2003)关于匈牙利更新世河流沉积物的研究表明,河流沉积物磁化率值主要与重矿物中磁铁矿的含量有关,也就是与水流剥蚀基岩所产生的碎屑颗粒有关。图4中可见磁化率与砂级颗粒(0~4 $\phi$ )具有较好的正相关性,而与粉砂(4~8 $\phi$ )具有一定的反相关性,与粘土(8~12 $\phi$ )的相关性则很弱。推测是由于在河流沉积物中,沉积物磁化率的变化主要依赖于外源矿物,少数则来源于悬浮沉积物,在砂级(0~4 $\phi$ )沉积物中富含磁性颗粒(王建等,1996)。因此,河流沉积物中磁化率值的高低主要反映的是河流水动力情况,并不

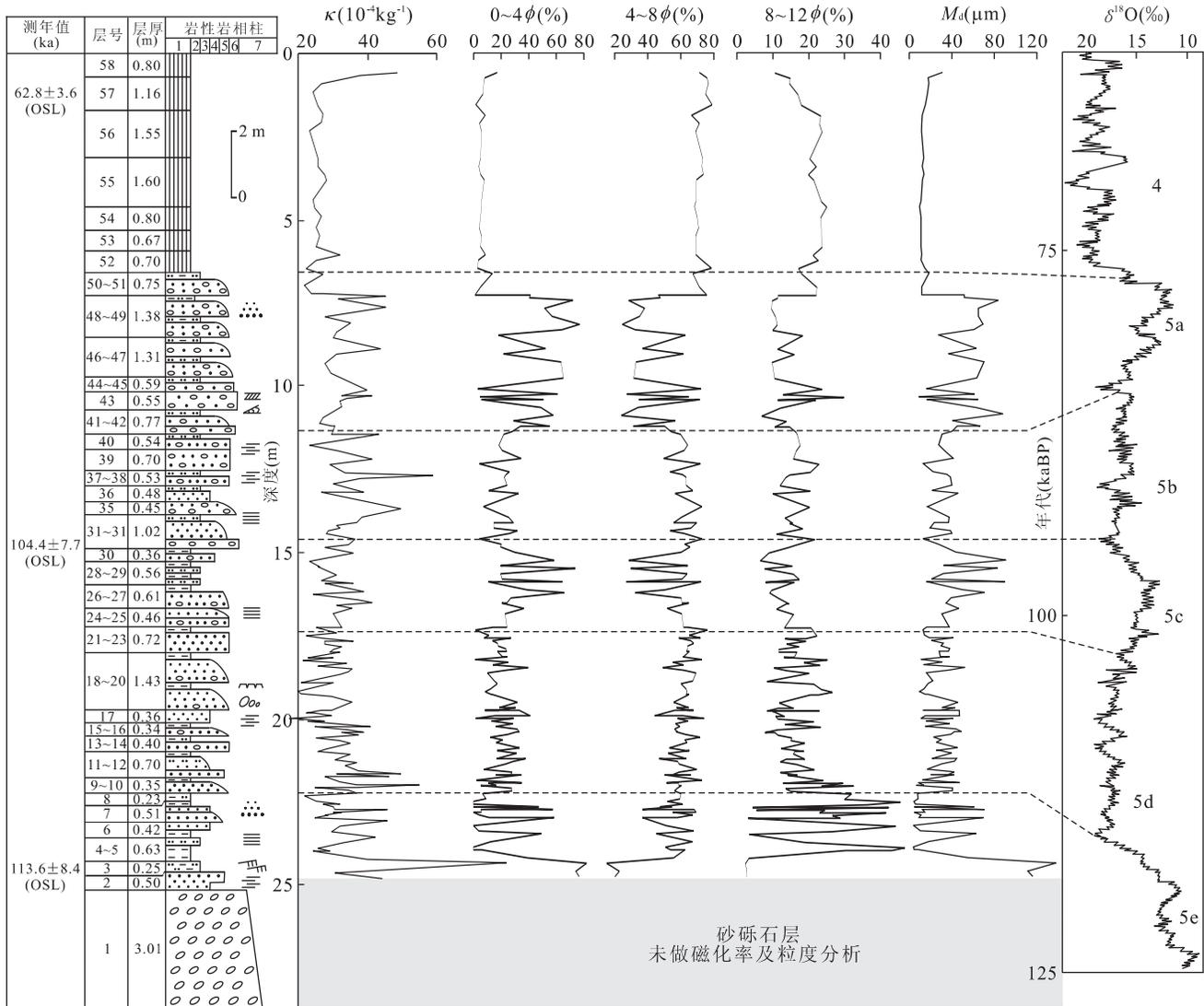


图 4 循化盆地黄河Ⅲ级阶地沉积物磁化率与粒度组分对比(图例同图 2)

Fig. 4 Comparison diagram of magnetic susceptibility and granularity for the third terrace of the Yellow River in Xunhua basin

能直接作为气候指标。

碎屑沉积物的粒度组合特征是地形条件、搬运介质、动力条件、物源与沉积环境等综合信息的记录(申洪源等, 2006)。在河流环境中, 粒度组合特征更多地反映了河流水动力条件的变化, 在本剖面中, 砂砾级沉积物对应于水动力较强的阶段, 气候温暖湿润, 粉砂、粘土级沉积物则对应于水动力较弱的寒冷干燥阶段, 与经典模型描述的不一致(Fuller *et al.*, 1998)。由于河流系统自身的复杂性, 不同沉积亚相的沉积动力、沉积速率均不同。经典模型中主要描述的是河漫滩沉积物的粒度特征与气候关系, 考虑到植被对沉积物粒度的影响, 而本剖面则主要为河道沉积, 水动力条件的影响占绝对优势, 所以粒度参数所指示的环境意义也不完全相同。

## 4 结论与讨论

(1) 循化盆地处于青藏高原东北缘, 发育的黄河Ⅲ级阶地为黄土覆盖阶地。阶地自下而上发育有一套因水动力条件变化而不同的沉积序列, 分别为河道滞留沉积、边滩沉积和天然堤沉积, 顶部覆盖次生黄土。Ⅲ级阶地的堆积约开始于 120 ka, 在末次间冰期—末次冰期的过渡时期(约 75 ka)黄河迅速下切, 阶地形成。

(2) 在磁化率分析、粒度分析的基础上, 结合 OSL 测年结果以及少量孢粉数据, 可以大致将循化盆地晚更新世环境演化分为 6 个阶段: 120~114 ka, 古河道水动力强, 气候暖湿; 114~105 ka, 古河道水动力明显减弱, 气候较为干冷; 105~98 ka,

古河道水力较强,气候较暖湿;98~85 ka,古河道水力减弱,气候转为温凉;85~75 ka,古河道水力较强,气候暖湿;75~63 ka,阶地接受风成黄土沉积,气候干冷。这6个阶段分别与 MIS5e-4 段相对应。

(3)河道沉积物的磁化率与砂级颗粒( $0\sim 4\phi$ )具较好的正相关性,但不能直接指示气候变化。而粒度参数则可作为气候变化的替代性指标,砂砾级沉积物对应于温暖湿润的气候阶段,粉砂、粘土级沉积物则对应于寒冷干燥的气候阶段。

通过对河流沉积物的分析,得出了以上结论,但是限于河流沉积过程的复杂性,不同的沉积亚环境所得出的结论也不尽相同,同时还有区域构造背景不同所造成的影响。所以需要更多的研究工作,才能更深入地探讨河流沉积物与气候环境间的关系。

## References

- Antoine, P., Lautridou, J. P., Laurent, M., 2000. Long-term fluvial archives in NW France: response of the Seine and Somme rivers to tectonic movements, climatic variations and sea-level changes. *Geomorphology*, 33(3-4): 183-207. doi: 10.1016/S0169-555X(99)00122-1
- Blum, M., 1994. Genesis and architecture of incised valley? II sequences: a Late Quaternary example from the Colorado River, Gulf Coastal Plain of Texas. *Siliclastic Sequence Stratigraphy—Recent Developments and Applications*, Vol. 58. American Association of Petroleum Geologists, Memoirs, 259-283.
- Bridgland, D., Maddy, D., 1995. River terraces as records of Quaternary climate oscillations. Abstracts INQUA XIV, Berlin, 37.
- Chang, H., An, Z. S., Qiang, X. K., et al., 2005. Formation of fluvial terrace and its tectonic and climate significance. *Marine Geology Letters*, 21(2): 8-11 (in Chinese with English abstract).
- Fuller, I. C., Macklin, M. G., Lewin, J., et al., 1998. River response to high-frequency climate oscillations in southern Europe over the past 200 k. y.. *Geology*, 26(3): 275-278. doi: 10.1130/0091-7613(1998)026<0275:RRTHFC>2.3.CO;2
- Hu, S. Y., Appel, E., Hoffmann, V., et al., 2002. Identification of greigite in lake sediments and its magnetic significance. *Science in China (Ser. D)*, 45(1): 81-87.
- Kasse, C., Bohncke, S., Vandenberghe, J., 1995. Fluvial periglacial environments, climate and vegetation during the middle Weichselian with special reference to the Hengelo Interstadial. *Mededelingen Rijks Geologische Dienst*, 52: 387-413.
- Ji, Y. P., Xia, Z. K., 2007. Comparison and primarily interpretation of magnetic susceptibilities in different sediments. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(6): 541-549 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. M., Yang, X. Q., Hriller, F., et al., 2008. High resolution magnetostratigraphy and deposition cycles in the Nihewan basin (North China) and their significance for stone artifact dating. *Quaternary Research*, 69(2): 250-262. doi: 10.1016/j.yqres.2007.11.002
- Li, Y. L., Yang, J. C., 1997. Response of alluvial terraces to Holocene climatic changes in the Hexi Corridor basins, Gansu, China. *Scientia Geographica Sinica*, 17(3): 248-252 (in Chinese with English abstract).
- Maddy, D., Bridgland, D., Westaway, R., 2001. Uplift-driven valley incision and climate-controlled river terrace development in the Thames Valley, UK. *Quaternary International*, 79(1): 23-36. doi: 10.1016/S1040-6182(00)00120-8
- Nador, A., Lantos, M., Toth-Makk, A., et al., 2003. Milankovitch-scale multi-proxy records from fluvial sediments of the last 2.6 Ma, Pannonian basin, Hungary. *Quaternary Science Reviews*, 22(20): 2157-2175.
- Pan, B. T., Li, J. J., Cao, J. X., et al., 1996. Study on the geomorphic evolution and development of the Yellow River in the Hualong basin. *Mountain Research*, 14(3): 153-158 (in Chinese with English abstract).
- Pan, B. T., Su, H., Hu, C. S., et al., 2006. Discovery of a 1.0 Ma Yellow River terrace and redating of the 0.8 Ma Yellow River terrace in Lanzhou area. *Progress in Natural Sciences*, 17(2): 197-205.
- Pan, B. T., Su, H., Liu, X. F., et al., 2007. River terraces of the Yellow River and their genesis in eastern Lanzhou basin during last 1.2 Ma. *Quaternary Sciences*, 27(2): 172-180 (in Chinese with English abstract).
- Shen, H. Y., Jia, Y. L., Zhang, H. M., et al., 2006. Environmental change inferred from granular size character of lacustrine sediment in Inner Mongolia Huangqihai, during 8.0-2.2 kaBP. *Arid Land Geography*, 29(4): 457-462 (in Chinese with English abstract).
- Thompson, R., Oldfield, F., 1986. Environmental magnetism. Allen & Unwin, London, 1-227.
- Vandenberghe, J., 1993. Changing fluvial processes under changing periglacial conditions. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 88: 17-28.
- Vandenberghe, J., 1995. Timescales, climate and river development. *Quaternary Science Reviews*, 14(6): 631-638.

doi:10.1016/0277-3791(95)00043-O

- Wang, J., Liu, Z. C., Jiang, W. Y., et al., 1996. A relationship between susceptibility and grain-size and minerals, and their paleo-environmental implications. *Acta Geographica Sinica*, 51(2): 155-163 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P., Jiang, H. C., Yuan, D. Y., et al., 2008. Stratigraphic structures and ages of the second and third fluvial terraces along the bank of Huanghe River in Lanzhou basin, western China, and their environmental implications. *Quaternary Sciences*, 28(4): 553-563 (in Chinese with English abstract).
- Xia, K. S., Xie, S. Y., He, D. X., 2007. Characterization of magnetic susceptibility changes of the Jiangbei conglomerate in Chongqing and its paleo-environmental implications. *Yangtze River*, 38(2): 123-125 (in Chinese).
- Yao, T. D., Shi, Y. F., Qin, D. H., et al., 1997. Climate variation since the Last Interglaciation recorded in the Guliya ice core. *Science in China (Ser. D)*, 27(5): 447-452 (in Chinese).
- Yang, X. Q., Li, H. M., 2002. The correlation between the content of the different grain size and magnetic susceptibility in lacustrine sediments, Nihewan basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(4): 675-679 (in Chinese with English abstract).
- Yue, L. P., Lei, X. Y., Qu, H. J., 1997. The age of terrace development in the middle reaches of the Yellow River. *Geological Review*, 43(2): 186-192 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Ji, J. L., et al., 2010. Paleogene-Neogene stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qinghai-Tibet plateau and their response to uplift of the plateau. *Science in China (Earth Sciences)*, 53(9): 1271-1294.
- Zhao, Z. M., Liu, B. C., 2003. Relation between the formation of the Yellow River valley landforms from Gonghe, Qinghai to Lanzhou, Gansu and the uplifting in north-east part of Qinghai-Xizang plateau. *Northwestern Geology*, 36(2): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., Zhao, J. B., 2007. Climate change was indicated by the magnetic susceptibility in Gaoling Weihe River floodplain near 120 years. *Journal of Soil and Water*

*Conservation*. 21(3): 196-200 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 常宏, 安芷生, 强小科, 等, 2005. 河流阶地的形成及其对构造与气候的意义. *海洋地质动态*, 21(2): 8-11.
- 吉云平, 夏正楷, 2007. 不同类型沉积物磁化率的比较研究和初步解释. *地球学报*, 28(6): 541-549.
- 李有利, 杨景春, 1997. 河西走廊平原区全新世河流阶地对气候变化的响应. *地理科学*, 17(3): 248-252.
- 潘保田, 李吉钧, 曹继秀, 等, 1996. 化隆盆地地貌演化与黄河发育研究. *山地研究*, 14(3): 153-158.
- 潘保田, 苏怀, 胡春生, 等, 2006. 兰州地区 1.0 Ma 黄河阶地的发现和 0.8 Ma 阶地形成时代的重新厘定. *自然科学进展*, 16(11): 1411-1418.
- 潘保田, 苏怀, 刘小丰, 等, 2007. 兰州东盆地最近 1.2 Ma 的黄河阶地序列与形成原因. *第四纪研究*, 27(2): 172-180.
- 申洪源, 贾玉连, 张红梅, 等, 2006. 内蒙古黄旗海湖泊沉积物粒度指示的湖面变化过程. *干旱区地理*, 29(4): 457-462.
- 王建, 刘泽纯, 姜文英, 等, 1996. 磁化率与粒度、矿物的关系及其古气候意义. *地理学报*, 51(2): 155-163.
- 王萍, 蒋汉朝, 袁道阳, 等, 2008. 兰州黄河 II 和 III 级阶地的地层结构、年龄及环境意义. *第四纪研究*, 28(4): 553-563.
- 夏凯生, 谢世友, 何多兴, 2007. 重庆江北砾岩磁化率变化特征及其古环境意义. *人民长江*, 38(2): 123-125.
- 姚檀栋, 施雅风, 秦大河, 等, 1997. 古理雅冰心中末次间冰期以来气候变化记录研究. *中国科学(D 辑)*, 27(5): 447-452.
- 杨小强, 李华梅, 2002. 泥河湾盆地沉积物粒度组分与磁化率变化相关性研究. *沉积学报*, 20(4): 675-679.
- 岳乐平, 雷祥义, 屈红军, 1997. 黄河中游水系的阶地发育时代. *地质论评*, 43(2): 186-192.
- 赵振明, 刘百箴, 2003. 青海共和至甘肃兰州黄河河谷地貌的形成与青藏高原东北缘隆升的关系. *西北地质*, 36(2): 1-12.
- 周晓红, 赵景波, 2007. 近 120 年来高陵渭河河漫滩沉积物磁化率指示的气候变化. *水土保持学报*, 21(3): 196-200.