

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0118

WANG Zhaoduo, HUANG Chunhang, ZHOU Yali, et al. Formation of the sedimentary stratigraphy at the first bend of the Yellow River in the Zoige Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(4): 1175-1187. [王兆夺, 黄春长, 周亚利, 等. 若尔盖盆地黄河第一湾河岸沉积地层序列及其成因研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(4): 1175-1187.]

若尔盖盆地黄河第一湾河岸沉积地层序列及其成因研究

王兆夺¹, 黄春长², 周亚利², 戎晓庆³, 查小春²,
庞奖励², 炊郁达³, 尚瑞清²

(1. 黄冈师范学院 地理与旅游学院, 湖北 黄冈 438000; 2. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710016;
3. 中国科学院 地球环境研究所, 陕西 西安 710061)

摘要: 经过在若尔盖盆地进行全面野外考察, 在黄河第一湾岸边发现了沉积序列清晰的、具有代表性的完整沉积地层剖面。通过沉积学和地层学特征和沉积相的观测分析, 结合实验室粒度分析、数据处理和测年断代, 其结果表明: 该剖面底部蓝灰色古湖相沉积层反映出盆地内部在OSL年龄35 ka之前为较深的湖泊。其上覆盖的风沙与泥炭互层, 反映出在该区域湖水消失之后, 在30 ka之前古湖底出现泥炭沼泽, 同时风沙作用盛行。而浊黄橙色古洪水沉积层(OFD1)则反映出在30~27 ka之间, 曾经有来自于黄河源区流域的规模巨大的洪水进入若尔盖盆地, 在古湖底泛滥并且将其携带的分选良好的细沙与粉沙质泥沙堆积下来。该剖面中部厚度达5~7 m的河漫滩-风沙层, 沿着河岸追索, 则可见其表现为高低起伏的古沙丘。这表明在末次冰期盛期和冰消期, 气候干旱寒冷, 黄河已经下切形成其河槽, 其河漫滩沉积物被强劲的风力吹扬, 形成连绵起伏的沙丘。该层之上所覆盖的浊黄橙色古洪水沉积层(OFD2), 则反映出在全新世初期9.86~8.28 ka之间, 来自于黄河源区流域的大洪水再次进入盆地, 在黄河第一湾两岸的古湖底沉积了分选良好的细沙质与粉沙质的泥沙。到了全新世中期后, 若尔盖盆地风沙作用依然盛行, 黄河河槽深切, 第一湾两岸接受沙尘暴沉积。在全新世中期的相对温暖湿润气候条件之下, 沙尘暴沉积物被改造为亚高山草甸黑土类土壤, 成熟度极高。到了全新世晚期以来, 风沙作用与沙尘暴沉积过程持续, 沙尘暴沉积物也被改造为亚高山草甸黑土层。本文研究对于深入理解黄河源区末次冰期以来环境变化与地表过程演变, 以及晚更新世以来的气候水文变化规律具有重要的科学意义。

关键词: 黄河第一湾; 末次冰期; 全新世; 环境变化; 若尔盖盆地

中图分类号: P534.63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)04-1175-13

0 引言

地处青藏高原东部的若尔盖盆地, 在更新世末期发生了重要的水文地貌事件, 盆地古湖泊的消亡以及黄河水系的贯通, 影响了整个黄河流域水文地貌格局和环境变化过程^[1-2]。若尔盖盆地环境变化受到了青藏高原新构造隆升和大气环流变化的双重影响, 早期已经有学者利用湖泊沉积物钻孔岩芯^[3-4]、沼泽泥炭^[5]、地表风沙^[6-7]、水文与气候^[8]、植

物群落与植被^[9]、古脊椎动物化石^[10]等材料开展了一系列的研究。综合来看, 主要是围绕古湖泊的消亡、河流变迁和风沙活动所做的工作, 认为若尔盖盆地在黄河贯通、形成黄河第一湾之前, 长期处于湖泊环境^[11]。但是对于末次冰期以来反映若尔盖古湖演变、黄河水系演变的沉积物、沉积相、地表过程、环境事件以及测年断代等方面的研究相对比较薄弱。最近, 地貌与第四纪学界对若尔盖盆地下游

收稿日期: 2021-09-28; 修订日期: 2021-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971116; 41801060)资助

作者简介: 王兆夺, 副教授, 主要从事地表过程与沉积环境研究. E-mail: joedonwang@163.com

通信作者: 黄春长, 教授, 主要从事环境演变与灾害研究. E-mail: cchuang@snnu.edu.cn

玛曲断陷谷地黄河阶地研究,黄河古洪水事件、以及末次晚冰期以来风成黄土和古土壤序列的研究,取得了可喜的成果^[12-14]。这里,通过对若尔盖盆地黄河第一湾各个地段河岸天然暴露剖面沉积物的深入调查和分析研究,以白河汇入口下游甲央玛河段黄河岸剖面沉积物粒度分析结果为基础,探索末次冰期以来若尔盖盆地内部沉积物性质、沉积相及其反映出的地表过程和环境变化的规律,以及由河流洪水沉积物记录的黄河古洪水事件。这个研究结果对于揭示若尔盖盆地水系演变及环境变化过程具有重要的科学意义。

1 研究区概况

若尔盖盆地是松潘地块北缘与西秦岭造山带相接触的边缘地带,高原面总体强烈隆升过程中周缘产生断裂、盆地的相对弱下沉构成了青藏高原东北缘典型的新生代断陷盆地,盆地基底主要为三叠系灰黑色炭质板岩、白垩系肉红色砾岩,以及上覆第三系、第四系松散沉积物^[15]。在地理位置上,若尔盖盆地属于青藏高原东部边缘黄河上游源区^[16],位于四川阿坝和甘肃甘南交汇地带,总面积约19 600 km²,是长江和黄河的分水岭,作为季风区与青藏高原交汇地带,该区在西伯利亚高压和内蒙古高压的作用下受到了东亚西南季风和东南季风控制^[17]。在地貌上,在盆地内部由宽谷和缓丘相间分布,其核心部分海拔介于3 400~3 500 m之间,而周边东、南、西、北分别有岷山、阿尼玛卿山、邛崃山、西倾山包围,其海拔均在4 000 m以上^[11],周边山地见有现代冰川分布,也发育有古冰川遗迹,据研究认为,中更新世以来,有2~3期冰川作用,见有冰斗、角峰、U形谷、终碛以及侧碛等冰川地貌^[18]。气候水文上,属于寒温带湿润季风气候,特点是寒冷、温差大、霜冻期长,年均温为1.1~1.2℃,年降水量为600~650 mm,集中在6—8月,近年来,随着气候变暖的影响,若尔盖盆地年均降雨量呈现减少趋势^[19]。生态环境上,植被以亚高山草甸为主,沼泽植被与沼泽草甸发育^[20]。如今,若尔盖湿地面临着一系列问题,如湿地退化和萎缩,湿地沙化,生态功能减弱,流域径流趋于减少等^[21]。盆地内风沙作用强烈,年均风速为2.59 m·s⁻¹,总体春季最强,平均为3.14 m·s⁻¹,在不同的季节,主要来自NWW、NE和NNE方向的强风,构成了风沙作用的主要动力,其中盛行风向为NWW,该方向的输沙势占年输沙势的

37.36%^[22-23]。

黄河通过采日玛乡基岩峡谷向东南流入若尔盖盆地,在盆地内流程约110 km,自白河口拐弯向西北流,在接纳黑河以后,自玛曲县城南段流出盆地。黄河河道在若尔盖盆地之内形成一个巨大的U形弯曲,被称为“黄河第一湾”(图1)。其沿途随着河槽比降、河床质、悬移质泥沙性质与含量变化,以及大小支流入汇的影响,黄河干流河型在不同河段呈现出网状、辫状、分叉状和曲流等,反复多次变化^[11,24]。

2 数据与方法

2.1 剖面位置

通过详细的野外考察,在若尔盖县唐克镇白河汇入口下游黄河右岸发现出露良好,沉积物层序清晰,未经人类活动扰动,保存完好的剖面。通过在两岸大范围调查,确认该剖面所在区域没有受到曲流作用和牛轭湖的干扰,而其底部兰灰色古湖相淤泥层在不同河段的剖面皆有出露,能够反映出该区域从湖泊向着沼泽湿地和河流演变的过程。因其处于甲央玛山丘坡脚下,定名为甲央玛剖面(JYM)。该河段黄河水位海拔大致在3 425~3 428 m之间,由于其剖面中部夹有高低起伏变化的古沙丘,导致河岸前沿高度变化在8~12 m之间。根据沉积物宏观特征来看,甲央玛剖面沉积物主要有古湖相、河流相、沼泽相、以及风成沉积物如风沙层、黄土、古土壤和现代草甸土壤。经过详细的观察测量和沉积物与地层描述,在甲央玛剖面划分出沉积地层单元和序列框架,并且在各个关键性层位采集了沉积物样品(表1)。根据该河段不同位置沉积物的出露状况,深度在0~5 m的样品采自于JYM-A地点,而深度5~11 m的样品,采自于JYM-B地点(图1~3),共采集沉积学样品20个,OSL样品两次共采集14个。同时也在河槽之外采集了黄河现代洪水沉积物样品和现代沙丘风沙样品,以便于对比分析和鉴别。

2.2 研究方法

在野外对于JYM-AB剖面进行清理,考察观测描述与记录之后,在剖面各个关键性层位进行沉积物和OSL样品采集,编号装袋,避光保存,带回实验室进行前处理及上机测试。对于释光年代样品首先采用HCl(10%)和H₂O₂(30%)溶液分别去除碳酸盐和有机质,使用筛分法得到90~125 μm的粗颗粒,



图1 若尔盖盆地黄河第一湾水系及甲央玛(JYM-A、JYM-B)研究地点位置图

Fig. 1 Drainage system and the study JYM-A, JYM-B sites on the first bend of the Yellow River in the Zoige Basin

表1 若尔盖盆地黄河第一湾河岸JYM-AB剖面地层描述

Table 1 Stratigraphic description of the JYM-AB profile at the first bend of the Yellow River in the Zoige Basin

地层名称与符号	深度/cm	地层特征描述
现代草甸土壤(MS)	0~80	灰棕色(7.5YR6/2),湿时为黑棕色(7.5YR3/1),细沙-粉沙质地,团粒-团块状构造,疏松多孔,植物根系发育,底部见有动物骨骼碎片,厚度在50~80 cm
全新世古土壤层(S ₀)	80~160	棕灰色(7.5 YR6/1),细沙-粉沙质地,团粒-团块状构造,见有大量黄色锈斑,并在底部有薄层风沙层出现,在长期暴露的剖面,可见灰白色可溶盐类凝结物,厚度在60~80 cm之间
古洪水沉积层(OFD2)	160~260	浊黄橙色(10YR7/3),粉沙与细沙交互出现,纹层内质地均匀疏松,为黄河泛流洪水(overbank flood deposit)沉积物,厚度变化在100~250 cm之间
河漫滩-风沙层(F-WD)	260~800	亮黄棕色(2.5Y7/6),常见斜层理,其中风成沙为细沙质地,河流相沙为中沙质地,结构疏松,含有锈黄色斑,厚度变化大致在500~700 cm之间。在该层位底部曾经出土晚更新世披毛犀动物群的化石 ^[10]
古洪水沉积层(OFD1)	800~900	浊黄橙色(10YR7/3),粉沙与细沙互层,纹层内质地均匀疏松,为黄河泛流洪水(overbank flood deposit)沉积物,厚度变化大致在80~200 cm之间,与下伏湖泊相呈不整合接触关系
泥炭-风沙互层(P-WD)	900~960	风成沙层为浊黄橙色(10YR7/4),细沙质地,泥炭层为黑棕色(7.5YR3/1),风成细沙与泥炭层呈互层状,该层成透镜状,厚度在0~60 cm之间
古湖相淤泥层(PLD)	960~?	淡蓝灰色(5B7/1),粉沙-黏土质地,均匀致密,含有大量黄色锈斑,在开挖过程当中冒出明显的H ₂ S臭味,是若尔盖古湖沉积物,在黄河夏季平河水位以上可见厚度在150~300 cm之间

用HF溶液(30%)进行去长石溶蚀处理,再用适量HCl溶液(10%)去除溶蚀过程产生的氟化物,经过IR检验来确保样品当中长石信号可以忽略不计。OSL样品等效剂量在Risø-TL/OSL DA-20型全自动释光仪上测试完成。测试矿物采用石英颗粒,测试过程中考虑了风成沉积物与水成沉积物在最后一次被埋藏前晒退是否彻底,并做了晒退程度的检

验^[25],对测年信号中的快组分、中组分以及慢组分进行了分析,篇幅所限,本文不再赘述。样品的U、Th、K含量是在西安地质矿产研究所采样电感耦合等离子质谱法测定。宇宙射线对剂量率的影响是依据采样地点所在位置的经纬度、海拔高度、埋藏深度和样品密度等计算获得。样品含水量在实验室实测含水量基础上,结合若尔盖盆地实际土壤湿

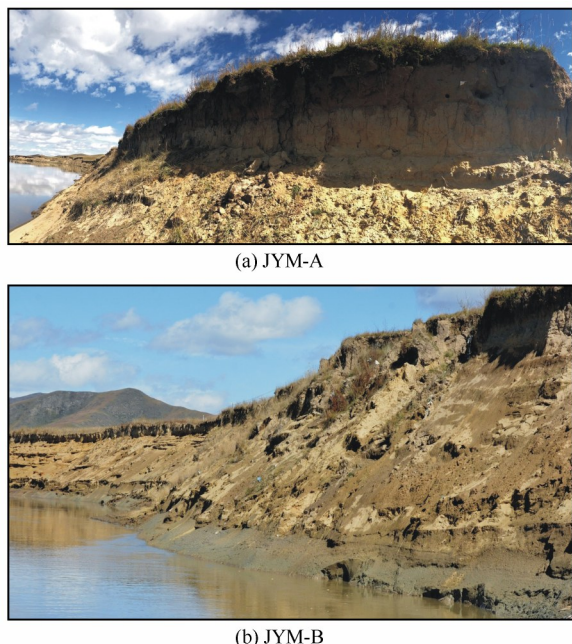


图2 若尔盖盆地黄河第一湾河岸 JYM-A 和 JYM-B 剖面野外特征

Fig. 2 The JYM-A and JYM-B profiles at the first bend of the Yellow River in the Zoige Basin

度情况进行了校正。样品最终 OSL 年龄采用 AGE2003 软件计算获得。

样品的 U、Th、K 含量是在西安地质矿产研究所采样电感耦合等离子质谱法测定。宇宙射线对剂量率的影响是依据采样地点所在位置的经纬度、海拔高度、埋藏深度和样品密度等计算获得。样品含水量在实验室实测含水量基础上,结合若尔盖盆地实际土壤湿度情况进行了校正。样品最终 OSL 年龄采用 AGE2003 软件计算获得。

样品粒度测试采用美国 Beckman 公司生产的 LS13320 型激光粒度仪进行测试,在实验过程中,将遮光度控制在 8%~12%,仪器误差控制低于 4%。具体前处理方法和上机测试步骤为:(1)称取 0.2~0.4 g 的样品(黄土和古土壤样品称取 0.25 g,河漫滩沙与风成沙称取 0.4 g),置于烧杯,为去除样品中的有机质和碳酸盐类物质,需加入 10 mL 10% 的过氧化氢溶液以及 10 mL 10% 的稀盐酸,并置于加热板加热,使样品充分反应后,取下样品放置在试验台上冷却;(2)向余液中加入蒸馏水,然后静置 72 h,多次清洗,直至烧杯溶液呈中性,然后用导管将烧杯中上部清液抽出;(3)在测试前,对于黏性较大的样品,为了使其充分分散,需要使用超声波将其震荡 10~15 分钟。然后配置 5 mL 0.05 mol·L⁻¹ 的六偏磷酸钠,加入样品之中;(4)将样品全部倒入激光粒

度仪中测试,每个样品测试 3 次,取其平均值。

样品粒度组成数据的端元分析,认为在沉积环境复杂的情况下,其沉积物往往是多种动力和物源综合作用的结果,所以利用激光粒度仪测试范围的粒度全样往往只能反映出总体上的沉积学特征。通常,一组沉积物样品每个样品对于每种动力组分的含量是不同的,而且每一种动力往往会使得样品粒级服从一种粒度频率分布模式,从统计学意义上把多元化的沉积动力或者物源拟合提取出来,为精准识别单一动力及物源提供了可能,端元分析模型由 Weltje^[26] 提出后,后来不断改进^[27-29],并在海洋沉积物、湖泊沉积物、古洪水沉积物、黄土剖面沉积学粒度分析中均得到了广泛的应用^[30-35],发现能够有效灵敏地判断物源和沉积动力。本文中采用粒度端元分析手段,辅助分析研究剖面各层位沉积物可能的成因及搬运沉积动力特点。

3 结果与分析

3.1 测年结果

对于甲央玛剖面的 OSL 测年结果表明,整个河岸剖面沉积过程连续,年龄值表现为由下向上逐渐减小的趋势。现代土壤 MS 层底部 0.75~0.80 m 深度年龄为 (1.66±0.11) ka,古土壤 S₀ 层底部 1.55~1.60 m 深度年龄为 (7.47±0.49) ka,古洪水沉积物 OFD2 层顶部 1.65~1.70 m 深度年龄为 (8.28±0.47) ka,OFD2 层底部 2.55~2.60 m 深度年龄为 (9.86±0.68) ka,河漫滩-风沙层 F-WD 顶部 2.75~2.80 m 深度年龄为 (12.05±1.11) ka,泥炭-风沙互层 P-WD 顶部 905~910 cm 深度年龄为 (30.92±2.30) ka,蓝灰色古湖相淤泥层 PLD 顶界 9.65~9.70 m 深度年龄为 (35.32±2.53) ka。另外,在该剖面河漫滩-风沙层 F-WD 底部,曾经出土猛犸象等末次冰期动物群的化石,其 ¹⁴C 年龄值为 (22.65±0.3) ka B. P.^[10],采用 IntCal 软件校正年龄为 (26.95±0.65) ka B. P.。

3.2 沉积学粒度特征

沉积物的粒度特征是判断沉积物物源、搬运动力以及沉积环境的重要指标^[36-37]。根据测试结果,绘制粒度自然频率分布曲线(图 4),从曲线形态来看,各地层单元样品粒度频率曲线的差异性较大,多呈多峰特点,显示出多源或多动力叠加的特征。蓝灰色古湖相沉积物样品粒度频率曲线主峰出现在粗粉沙段,介于 35~45 μm 之间,并有细尾和粗尾

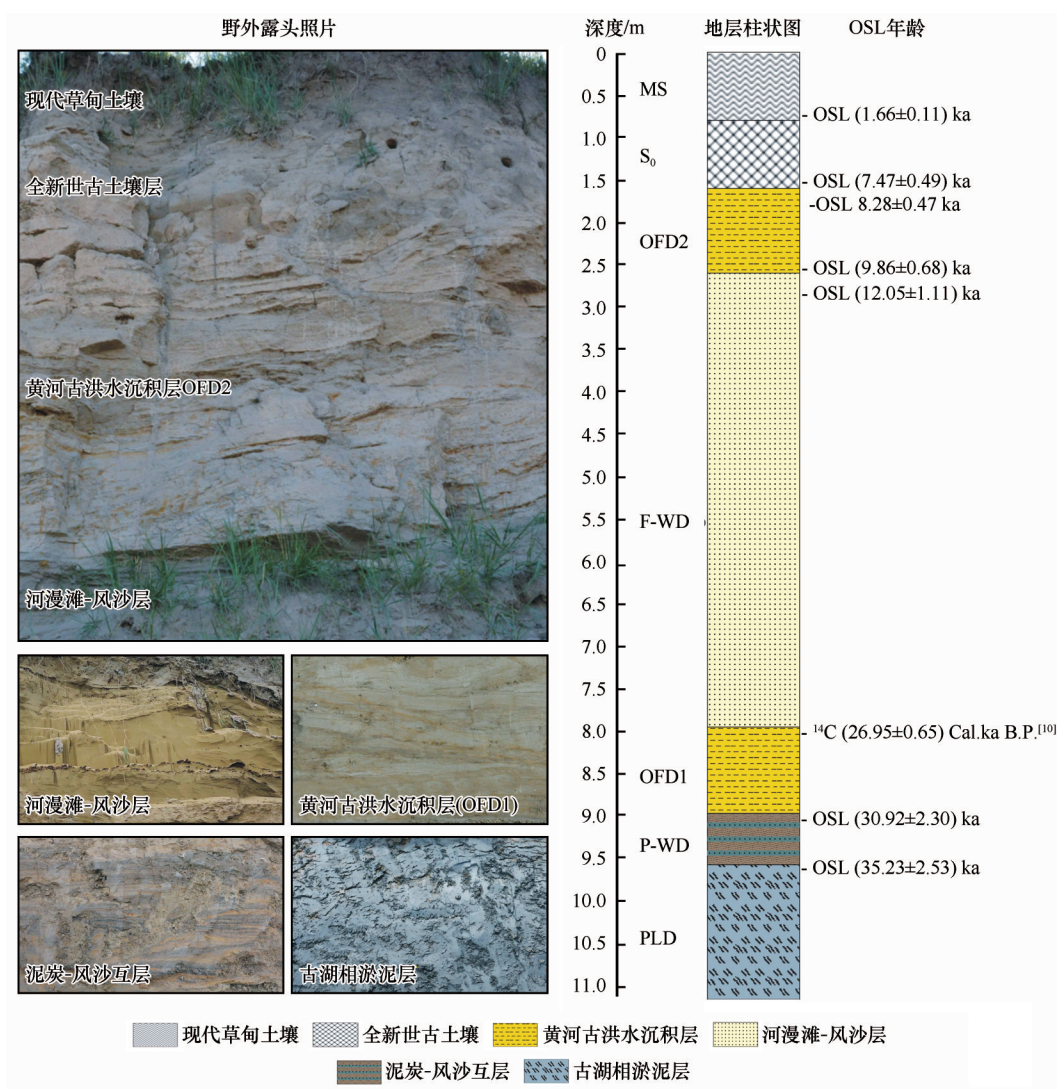


图3 若尔盖盆地黄河第一湾河岸 JYM-AB 剖面沉积物地层序列

Fig. 3 Stratigraphic sequence of the JYM-AB profile at the First Bend of the Yellow River in the Zoige Basin

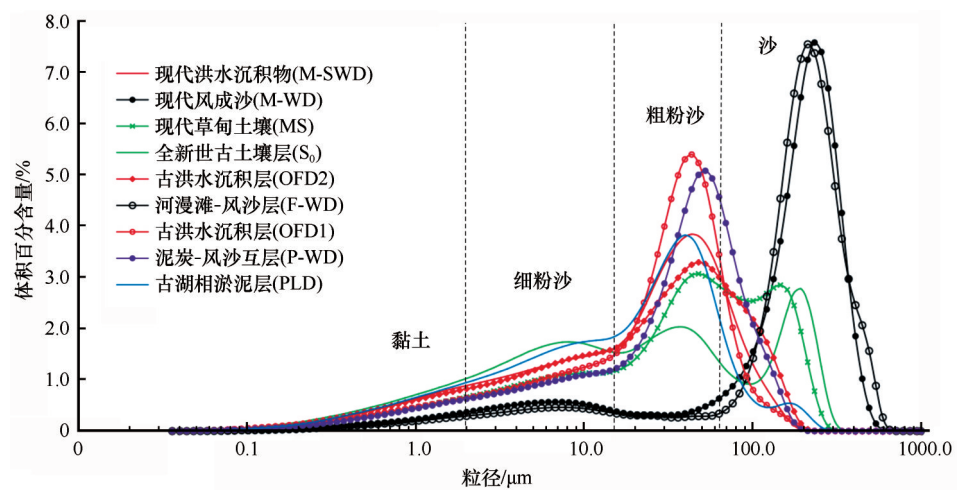


图4 若尔盖盆地黄河第一湾河岸 JYM-AB 剖面沉积物粒度频率分布曲线

Fig. 4 Grain-size distribution frequency curves of the sediments in the JYM-AB profile in the Zoige Basin

特点,泥炭-风沙互层样品的曲线峰值出现在粗粉沙段,介于 50~60 μm 之间,有明显的细尾。黄河古洪水 OFD1 和 OFD2 样品的粒度曲线形态有所差异,可能是由于物源组合、搬运距离或者洪水规模

的差异所引起, OFD1 的主峰介于 40~50 μm 之间, 有细尾, 而 OFD2 峰值介于 30~40 μm , 细尾更明显, 两者相比较 OFD1 粒级组分更分散。河漫滩-风成沙层和现代风沙层对比来看, 两者吻合度较高, 与采自其他地层的样品差异显著, 主峰介于 200~300 μm 范围内, 亦有细尾特点。全新世古土壤和现代草甸土壤层样品粒度曲线均呈现出多峰形态, 说明后期经过了明显的改造作用, 使得该层位的沉积物粒级组分发生了变化。现代草甸土壤在沙和粗粉沙范围呈现出双峰形态, 在黏土和细粉砂质范围呈现明显的细尾, 主峰出现在沙级(>150~200 μm) 和粗粉沙级(40~50 μm) 范围。全新世古土壤层更明显地显示出 3 峰形态, 3 个峰值分别在细粉沙、粗粉沙和沙质范围, 粒径范围分别介于 5~10 μm 、30~40 μm 和 100~150 μm 区间。

本文中采用矩法获得粒度参数^[38]。粒度参数是粒度频率分布曲线形态特征的量化反映, 文中采用粒度参数有^[39]: 中值粒径(Md)、平均粒径(Mz)、分选系数(δ)、偏度(Kg)、峰度(Ku)。中值粒径(Md)是累积频率曲线 50% 处对应的粒径, 也就是说该粒级是把沉积物颗粒组分一分为二的指标, 平均粒径(Mz)表示沉积物颗粒总体的粗细程度, 分选系数(δ)反映沉积物颗粒的均匀程度, 而偏度系数(Kg)是反映曲线相对对称轴的偏离程度, 峰度系数(Ku)是反映曲线顶端尖峭或扁平程度的指标。JYM-AB 剖面中, 蓝灰色古湖相淤泥层样品的中值粒径为 18.9 μm 、平均粒径为 13.53 μm 、分选系数为 4.53、偏度和峰度系数分别为-0.74 和 3.04, 属于较细的颗粒物组分、分选性较好、偏度系数较小、峰度值较低, 均说明该沉积物反映的是沉积动力小、物

源稳定沉积环境下的湖泊相沉积环境。泥炭-风沙互层的中值粒径为 35.72 μm 、平均粒径为 22.57 μm 、分选系数为 4.26、偏度和峰度系数分别为-1.27 和 4.10, 该特征说明了泥炭沼泽地受到风沙活动的频繁干扰, 因而在泥炭层中反复出现薄的风沙沉积物夹层。黄河古洪水沉积层 OFD1 样品中值粒径为 28.96 μm 、平均粒径为 18.34 μm 、分选系数为 4.16、偏度和峰度系数分别为-1.29 和 4.23, OFD2 样品中值粒径为 25.09 μm 、平均粒径为 17.09 μm 、分选系数为 4.86、偏度和峰度系数分别为-0.86 和 3.07。而现代洪水沉积物的中值粒径为 23.41 μm 、平均粒径为 15.28 μm 、分选系数为 4.58、偏度和峰度系数分别为-0.90 和 3.10, 与两期古洪水沉积物以及湖相淤泥沉积物均显示出粒径较小、分选较好的特点。河漫滩-风沙层样品的中值粒径为 185.47 μm 、平均粒径为 114.96 μm 、分选系数为 4.69、偏度和峰度系数分别为-2.04 和 6.59, 现代风成沙样品的中值粒径为 181.49 μm 平均粒径为 97.30 μm 、分选系数为 5.24、偏度和峰度系数分别为-1.80 和 5.40, 两者十分接近, 其自然分布频率曲线几乎重合, 表明河漫滩-风沙层堆积形成时期若尔盖盆地风沙活动强烈, 将河漫滩沉积物改造成为分选良好的风沙层。全新世古土壤样品中值粒径为 17.28 μm 、平均粒径为 15.85 μm 、分选系数为 6.26、偏度和峰度系数分别为-0.36 和 2.39。现代草甸土壤样品中值粒径为 38.12 μm 、平均粒径均值为 25.82 μm 、分选系数为 5.16、偏度和峰度系数分别为-0.96 和 3.12。两者相比较, 古土壤层样品平均粒径更小, 分选性更差, 曲线更对称峰度值更小, 说明经历了更充分的成壤改造作用(表 2)。

表 2 若尔盖盆地黄河第一湾河岸甲央玛(JYM-AB)剖面 OSL 测年数据与结果

Table 2 OSL dating results in the JYM-AB profile at the first bend of the Yellow River in the Zoige Basin

深度/cm	地层层位	含水 量/%	放射性元素含量			环境剂量率/ ($\text{Gy} \cdot \text{ka}^{-1}$)	等效剂量/Gy	OSL 年龄 /ka
			U/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Th/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	K/%			
75~80	表土层 MS 底部	23 \pm 5	1.60 \pm 0.3	9.88 \pm 0.6	1.79 \pm 0.04	2.50 \pm 0.13	4.15 \pm 0.17	1.66 \pm 0.11
155~160	古土壤 S ₀ 底部	21 \pm 5	2.17 \pm 0.4	10.41 \pm 0.7	1.88 \pm 0.04	2.75 \pm 0.16	20.51 \pm 0.64	7.47 \pm 0.49
165~170	古洪水 OFD2 顶部	20 \pm 5	2.11 \pm 0.4	11.61 \pm 0.7	1.97 \pm 0.04	2.74 \pm 0.15	22.66 \pm 0.33	8.28 \pm 0.47
255~260	古洪水 OFD2 底部	20 \pm 5	1.60 \pm 0.3	9.18 \pm 0.6	1.82 \pm 0.04	2.43 \pm 0.13	23.95 \pm 1.04	9.86 \pm 0.68
275~280	河漫滩-风沙层 F-WD 顶部	21 \pm 5	1.29 \pm 0.3	6.93 \pm 0.6	1.46 \pm 0.04	1.99 \pm 0.12	23.98 \pm 1.69	12.05 \pm 1.11
905~910	泥炭-风沙互层 P-WD 顶部	22 \pm 3	3.33 \pm 0.4	12.17 \pm 0.7	1.90 \pm 0.04	3.00 \pm 0.09	92.76 \pm 6.36	30.92 \pm 2.30
965~970	古湖相淤泥层 PLD 顶界	25 \pm 3	3.49 \pm 0.4	13.80 \pm 0.7	2.15 \pm 0.04	3.24 \pm 0.09	114.42 \pm 7.59	35.32 \pm 2.53

根据测试结果进行谢帕德三角分类, 把 JYM-AB 剖面上各个层位沉积物样品划分了 4 种类型(图

5): 沙、沙质粉沙、黏土质粉沙、沙-粉沙-黏土。而河漫滩-风沙层和现代风沙层属于较粗的沙质, 现

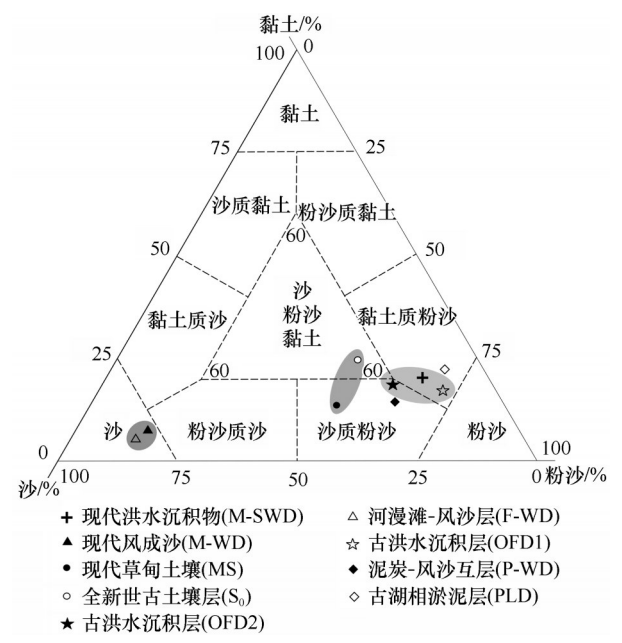


图5 若尔盖盆地黄河第一湾河岸甲央玛(JYM-AB)剖面沉积物粒度谢帕德三角分类图

Fig. 5 Shepard's triangle classification of surface sediments of the JYM-AB profile at the first bend of the Yellow River in the Zoige Basin

代草甸土壤、古洪水沉积层 OFD2 和沼泽相泥炭-风沙互层属于沙质粉沙,古湖相淤泥、古洪水沉积层 OFD1 以及现代洪水沉积物为黏土质粉沙,而全新世古土壤层属于沙-粉沙-黏土。

对 JYM-AB 剖面各地层单元各个关键性层位样品的粒度分析数据进行沉积学粒级区间划分(图 4、表 3)。可以明显地看出,除了河漫滩-风沙层和现代风成沙以大于 125 μm 粒级为主要组分,含量可达 68% 以上,其余地层单元粒级组分主要分布在 2~63 μm 粉沙质范围内。其中全新世古土壤层最优势

表3 若尔盖盆地黄河第一湾河岸 JYM-AB 剖面沉积物粒度参数

Table 3 The Grain-size parameters of the JYM-AB profile at the first bend of the Yellow River in the Zoige Basin

地层层位	Md/μm	Mz/μm	δ	Kg	Ku
现代洪水沉积物(M-SWD)	23.41	15.28	4.58	-0.90	3.10
现代风成沙(M-WD)	181.49	97.30	5.24	-1.80	5.40
现代草甸土壤(MS)	38.12	25.82	5.16	-0.96	3.31
全新世古土壤(S ₀)	17.28	15.85	6.26	-0.36	2.39
古洪水沉积层(OFD2)	25.09	17.09	4.86	-0.86	3.07
河漫滩-风沙层(F-WD)	185.47	114.96	4.69	-2.04	6.59
古洪水沉积层(OFD1)	28.96	18.34	4.16	-1.29	4.23
泥炭-风沙互层(P-WD)	35.72	22.57	4.26	-1.27	4.10
古湖相淤泥层(PLD)	18.90	13.53	4.53	-0.74	3.04

粒级为细粉沙粒级组分,其余现代草甸土壤、现代洪水沉积物、古洪水沉积层(OFD1、OFD2)、泥炭-风沙互层、古湖相淤泥层最优势粒级组分为粗粉沙,其次为细沙质。

通过对研究不同各地层单元沉积物样品粒度上从频率曲线形态、粒度参数、粒级划分、沉积物粒级组合命名几个方面进行了对比,不难发现,有些单元差异性显著,而有的单元特征并不明显。基于复杂的地表作用过程,在沉积物从物源到沉积动力搬运过程一直到后期不同程度的改造,都经历了复杂的过程,由此进一步对各个地层单元样品粒度做端元分析。

3.3 粒度端元分析

前文研究方法中提到,在沉积动力和物源多元化的情况下,沉积物中往往携带的是多种因素叠加的信息,采用统计学方法把混合组分分离出来,便能够更明晰地识别各沉积动力及物源特征。本文采用 Paterson 等^[26]的改进模型进行分析,这款软件模型 AnalySize 在 MATLAB 2014a 中运行计算,具有非参数自然状态下拟合和参数化拟合两类方式拟合端元组分。鉴于本文研究剖面采用各个关键性层位样品分析,沉积动力多元化,且采用非参数化拟合的端元曲线任然呈现出较明显细尾或小峰的情况,综合考虑,本文采用三参数 Gen. Weibull 分布参数法拟合端元组分,并尽可能选择端元数少的原则。同时考虑到本文研究剖面各沉积单元主要有风动力、水动力和成壤改造作用 3 个主要动力,所以不妨拟合出 3 个端元组分进行分析。通过对 JYM-AB 剖面粒度数据进行分析。结果显示(表 4、图 6),由各端元的粒度自然分布频率曲线均成良好的正态分布曲线特征,是一种完全理想状态下的动力分离。从曲线形态特征来看,端元 1 曲线主峰在细粉沙范围,为 10 μm 左右,曲线平宽,分选较差,而端元 3 曲线主峰在沙质范围,250 μm 左右,窄尖、分选好,而端元 2 曲线介于两者之间,主峰值在粗粉沙范围,50 μm 左右。在各地层上来看,在古湖相泥层、沼泽泥炭-风沙互层、OFD1、OFD2 以及现在洪水 SWD 中综合上述特征分析,推断端元 1 可能代表静态的沉积环境,包括洪水滞流、湖泊中稳定的静水环境以及沉积后的风化成壤作用。端元 2 可能代表典型的动态流水和风力搬运作用沉积。端元 3 是较强的地表风动力作用下,对河漫滩相沉积物进行的分选作用,较

表4 若尔盖盆地黄河第一湾河岸甲央玛(JYM-AB)剖面沉积学粒度组成特征

Table 4 Grain-size distribution in the JYM-AB profile at the first bend of the Yellow River in the Zoige Basin

地层层位	粒度组成/%					
	<2 μm	2~16 μm	16~63 μm	63~125 μm	125~250 μm	>250 μm
现代洪水沉积物(M-SWD)	12. 21	28. 77	42. 77	14. 82	1. 44	0
现代风成沙(M-WD)	4. 64	11. 31	5. 09	10. 41	38. 17	30. 38
现代草甸土壤(MS)	9. 16	22. 35	31. 94	21. 17	14. 93	0. 46
全新世古土壤(S ₀)	14. 07	34. 31	25. 22	8. 63	15. 70	2. 07
古洪水沉积层(OFD2)	11. 72	28. 16	37. 06	19. 25	3. 81	0. 00
河漫滩-风沙层(F-WD)	3. 86	9. 14	4. 11	9. 05	42. 43	31. 40
古洪水沉积层(OFD1)	9. 56	23. 50	53. 04	12. 65	1. 25	0
泥炭-风沙互层(P-WD)	8. 56	21. 13	44. 95	22. 82	2. 54	0. 00
古湖相淤泥层(PLD)	12. 51	33. 39	42. 33	8. 66	3. 01	0. 10

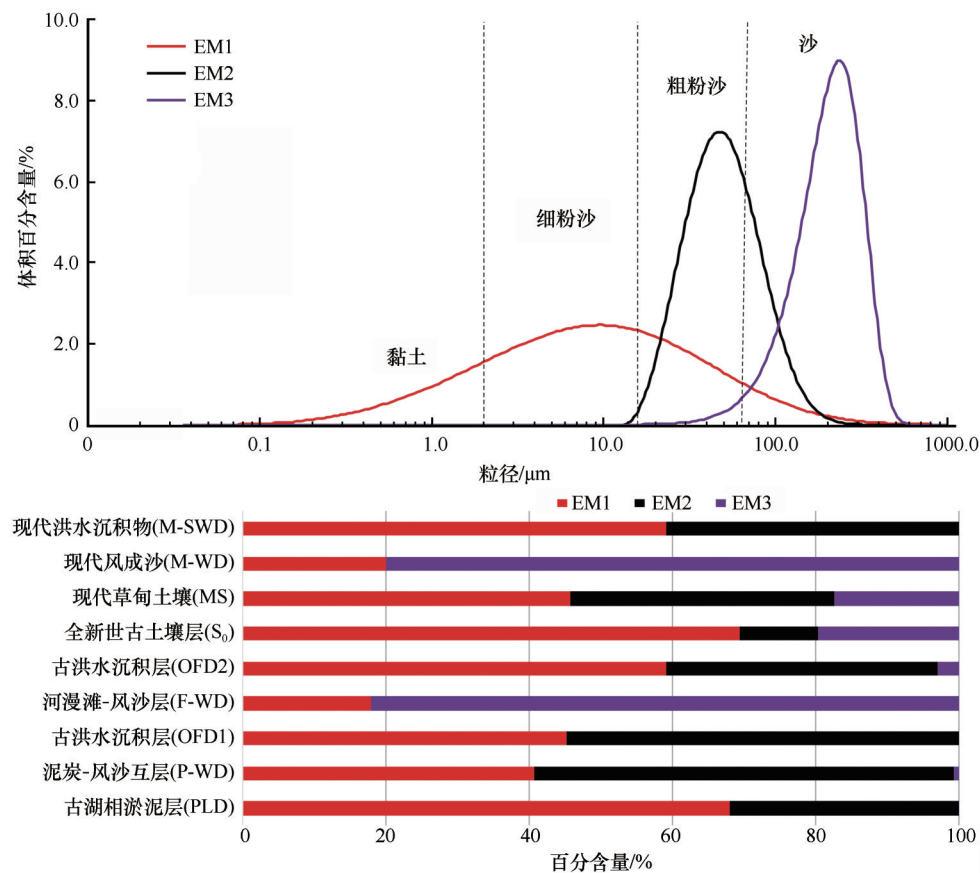


图6 若尔盖盆地黄河第一湾河岸JYM-AB剖面沉积物各端元粒度自然分布频率曲线和百分比含量

Fig. 6 Grain-size distribution frequency curves and percents end members of the sediments of each end member in the JYM-AB profile at the first bend of the Yellow River in the Zoige Basin

细的颗粒物被风吹走,剩下较粗的颗粒物堆积下来或近源搬运而来。

4 讨论

根据野外宏观观察结合样品粒度特征分析结果,对黄河第一湾甲央玛剖面呈现的地层单元所代表的沉积环境做进一步的探讨。

(1)古湖相淤泥层(PLD)处于研究剖面最底部、厚达2~3 m、尚未见底。宏观呈现出蓝灰色粉沙-黏土质地,均匀致密,分选较好,并见有大量的黄色锈斑特点,开挖过程还有臭味明显的H₂S气体逸出。微观粒度频率曲线呈现出明显细尾和粗尾,粒级组分总体偏细的特点,三角分类归为黏土质粉沙。本文粒度端元划分结果来看,端元组分包含了静态的

湖泊沉积环境为主和风力搬运作用为次的两种明显的端元组分。这种沉积学特征反映出该处沉积物是在较深的还原环境静水为主的湖泊沉积环境, 另外可能有高原面强劲风力从外源搬运而来的风成颗粒物不断沉降参与沉积。有研究认为^[1-3], 若尔盖盆地随着青藏高原隆升, 断陷盆地形成以后, 在黄河尚未贯通之前, 在一个较长的时期内属于典型高原湖泊环境, 是较大区域内河流水系的终点。对于若尔盖古湖消亡与黄河沟通的年龄问题, 由于测年结果差异性较大, 尚未统一认识, 综合多方面的结果, 认为是介于 37~18 ka 之间^[11,40]。从该剖面古湖相蓝灰色淤泥层顶界 OSL 年龄 (35.32 ± 2.53) ka 来看, 盆地内部在该区域的湖水在 35 ka 前后消失。这与前人在黄河支流黑河下游区域凹陷钻 RH 孔研究所得古湖水消失年代基本相当^[11,40]。

(2) 泥炭-风沙互层(P-WD)宏观上呈现纹层状的黑棕色细沙与泥炭层交互出现的特点, 成透镜状出现在湖相沉积层之上, 厚度达 50~60 cm。在微观粒度特征上, 分析样品是细沙和泥炭层混合后分析的结果, 粒度频率曲线有细尾特征, 主峰明显较下伏地层粗, 粒度组分以粗粉沙为主, 沉积学类型划分是沙质粉沙, 中值粒径和平均粒径均明显大于下伏古湖相沉积物, 分选性比湖相沉积层更好。依据本文粒度端元划分结果, 以端元 2 组分为主, 端元 1 组分次之, 含有极少量的端元 3 组分。由此可以认为, 黑棕色泥炭层是在古湖泊消失之后, 古湖底洼地出现泥炭沼泽, 沼泽草甸植被茂密, 同时, 在冬季盆地内风力十分强劲, 风沙作用在沼泽地带堆积了薄层风成沙。依据测年结果和气候背景, 可知在 35~30 ka 时期, 已经进入 MIS-3 温暖期的后期^[41-42]。这说明此时若尔盖盆地内部古湖泊已经干涸消失, 暴露的古湖底平原洼地呈现出泥炭沼泽环境, 伴随着地表强烈的风沙活动^[22-23]。

(3) 古洪水沉积层(OFD1)厚度可达 0.8~2.0 m, 性质为粉沙与极细沙互层, 纹层内质地均匀, 分选良好。粒度组分也是以粗粉沙为主, 分选更好, 按照三角分类沉积物类型划分为黏土质粉沙。端元动力组成来看, 与现代洪水滞流沉积物 M-SWD 相似, 主要呈现出河流泛流的沉积作用和滞流的沉积作用相结合的特征。综合分析来看, OFD1 表现出河流古洪水泛滥沉积相, 应属于在黄河贯通若尔盖盆地之时, 稳定河槽尚未形成的情况之下, 古湖水干涸消失之后黄河在古湖底泛流洪水沉积

物。这个层位的顶界曾经出土的披毛犀化石^[10], 对于其 ¹⁴C 测年结果进行校正后为 26.95 ka BP, 表明特大洪水事件发生在 MIS-3 温暖期向着末次冰期盛转折过渡时期。

(4) 河漫滩-风沙层(F-WD), 在若尔盖盆地内部黄河弯道的凹岸, 其最显著的特征是因为地层当中河漫滩沙-风沙层的流失导致河岸不断地坍塌(图 2)。在甲央玛河段, 可以看到剖面中部夹有 5~7 m 厚度的沙层, 顺河岸追索, 则可见其表现为高低起伏的古沙丘, 斜层理很发育。粒度组分以细沙为主, 中值粒径和平均粒径显著大于其他地层单元, 峰态很窄, 分选较好, 与现代风沙层 M-WD 样品的粒度频率曲线完全吻合, 沉积物类型三角划分属于细沙。其端元组分主要由河漫滩沙在强风作用下改造成为沙丘沙层, 并有少量的可能粘附于粗颗粒之上的细颗粒物。该层沉积物综合表现为河漫滩沙-风沙沉积相, 在末次冰盛期及其冰消期, 若尔盖盆地气候干旱寒冷, 而此时黄河已经下切形成河槽, 其河漫滩沉积物被强劲的风力吹扬, 形成了连绵起伏的沙丘。

(5) 古洪水沉积层(OFD2), 沿河岸可以看到, 在起伏的河漫滩-风沙层之上, 覆盖有厚度不等的黄河泛流古洪水沉积层, 表现为极细沙与粉沙交互出现的典型的斜层理(图 3)。野外现场调查可以看出其在地层当中古沙丘出现地段沉积较薄, 而在古沙丘之间洼地沉积厚度明显增大。粒度组分以粗粉沙为主, 中值粒径和平均粒径与 OFD1 相当, 与现代洪水沉积层 M-SWD 基本接近。沉积物类型为沙质粉沙, 粒度端元组分也与 OFD1 大致相同。这充分说明了在全新世早期, 气候逐渐变暖, 黄河源高山冰川消融, 在 OSL 9.86~8.28 ka 之间, 曾经有大量冰融水汇入黄河河道, 在盆地内漫溢出河槽而形成泛滥洪水。其悬移质泥沙在河槽之外沉积层厚度竟然达到 2.0~2.5 m, 足见当时泛滥洪水的规模是巨大的。

(6) 全新世古土壤层(S₀)呈现出棕灰色、细沙质粉沙质地、典型的团粒-团块构造, 多孔隙, 下部常常会含有大量锈斑的特点。其粒度频率曲线表现出三峰形态, 峰值分别在细粉沙、粗粉沙和沙质范围, 三角图归类为沙-粉沙-黏土质, 粒度参数来看, 中值粒径和平均粒径较小, 分选较差, 偏度和峰度值最低, 粒径在各区间分布较均匀。端元组分上表现了对风成沉积的显著的成壤改造作用。与黄

土高原地区全新世中期黑垆土相比较,其显著的特征是细沙含量较高。说明到了全新世中期,尽管气候温暖,亚高山草甸植被茂密,成壤改造作用显著,但是到了冬春季节,若尔盖盆地风力强劲,风沙作用仍然很盛行,近源沙尘暴沉积物随时被改造为亚高山草甸黑土类土壤,其成熟度极高。

(7)现代草甸土壤(MS)在若尔盖盆地的大草原面普遍发育,在宏观上表现为棕灰色亚高山草甸土,团粒-团块构造、疏松多孔、植物根系发育,在干燥时偏灰色,湿润时偏黑色。在微观上,粒度频率曲线表现与全新世古土壤层相似,也呈比较分散的多峰特点,细粉沙组分偏少,细沙质组分较多。从粒度参数来看,中值粒径和平均粒径比全新世古土壤层要大一些,分选性较差,粒级组分在各粒级区间也较均匀,端元组分上来看,两者接近,成壤改造作用比之古土壤 S_0 则较弱。由此说明,到了全新世晚期,总体上气温降低,而地表风沙流和沙尘暴沉积过程持续,强度也比较大。尽管成壤改造作用减弱,但沙尘暴沉积后也还是被改造为沙质粉沙质地的亚高山草甸黑土层,其地面亚高山草甸十分茂盛,成为适合于放牧的茂密草原。

5 结论

通过对若尔盖盆地黄河第一湾河岸沉积物的深入调查研究,选取甲央玛河段的剖面,在野外对其进行基本沉积物地层单元划分后,以其宏观特征和粒度为基础,进行沉积相和沉积动力学分析,结合测年断代结果,获得了对于若尔盖盆地内部地表环境演变的认识:

若尔盖盆地内部蓝灰色古湖相沉积物顶部测年结果,表明古湖水持续存在到35 ka才干涸消失。此前在一个持续较长的时段,作为当时内流水系的终点,周边河流搬运碎屑物质进入湖盆沉积,并有风成沉积物沉降沉积湖底的叠加作用的影响。盆地内部的湖水较深,淤泥质沉积物受到还原作用的影响而成为蓝灰色且有 H_2S 气体形成。在古湖彻底疏干之后,湖底洼地转变为泥炭沼泽相环境,但同时湖盆内有较强的风沙活动,干湖盆底部暴露的沙质沉积物被强劲风力吹扬在泥炭沼泽沉积,形成了泥炭-风沙互层沉积物。在距今30~27 ka之间,正是全球性MIS-3温暖期向着末次冰盛期转折过渡的时期,来自于黄河源地区的大洪水进入盆地到处泛滥,其携带的泥沙经过长距离分选,在盆地内部形

成具有微细层理的灰黄色粉沙大量沉积,与其下的蓝灰色古湖泥形成鲜明的对比。在末次冰盛期和冰消期相当长时期,若尔盖盆地气候干旱寒冷,高原面风力十分强劲,盆地内部风沙作用盛行。此时,黄河切割古湖底形成稳定的河槽,河漫滩沙层被高原面强劲风力改造形成连绵的风沙丘,古湖盆内部风沙沉积十分普遍。

根据OSL测年结果,显示在9.86~8.28 ka之间的全新世早期,黄河源区再次出现规模巨大的泛滥洪水时期。这可能由于全新世气候的变暖,高山冰川普遍性融化导致河流水系水量突增,导致黄河在盆地内部形成特大泛滥洪水。进入全新世中期大暖期,尽管若尔盖盆地夏季风显著地增强,气候变暖,降雨量增加,但是风沙作用仍然盛行,堆积在河岸高地的沙尘暴沉积物,皆被改造为成熟度极高的亚高山草甸黑土层。全新世晚期以来,随着全新世大暖期的结束,气温降低,夏季风减弱。但是在若尔盖盆地内部风沙作用持续,沙尘暴沉积物被改造成为沙质粉沙质地的亚高山草甸黑土层,其地面表现为植被茂密的亚高山草甸草原。本文研究发现的若尔盖盆地内部两期特大洪水事件,对于我们深刻理解晚更新世以来黄河源区的气候水文变化规律,具有十分重要的科学意义。

参考文献(References):

- [1] Yang Dayuan, Wu Shengguang, Wang Yunfei. On river terraces of the upper reaches of the Huanghe River and change of river system[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(2): 137-143. [杨达源, 吴胜光, 王云飞. 黄河上游的阶地与水系变迁[J]. *地理科学*, 1996, 16(2): 137-143.]
- [2] Hu S, Appel E, Wang S, et al. A preliminary magnetic study on lacustrine sediments from Zoigê Basin, eastern Tibetan Plateau, China: magnetostratigraphy and environmental implications[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 1999, 24(9): 811-816.
- [3] Wu Jinglu, Wang Sumin, Pan Hongxi, et al. Paleoclimate characteristics recorded by lake carbonate isotope in the RM core on the Tibetan Plateau[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 1997, 27(3): 255-259. [吴敬禄, 王苏民, 潘红玺, 等. 青藏高原东部RM孔140 ka以来湖泊碳酸盐同位素记录的古气候特征[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 1997, 27(3): 255-259.]
- [4] Chen F H, Bloemendal J, Zhang P Z, et al. An 800 ky proxy record of climate from lake sediments of the Zoige Basin, eastern Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 151: 307-320.
- [5] Sun Xiaohong, Zhao Yan, Li Quan. The Holocene Peatland Development and Vegetation Changes in Zoige Basin, Eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2017, 47(9): 1097-1109. [孙晓红, 赵艳, 李泉. 青藏高原东部若尔盖盆地全新世泥炭地发育和植被变化[J].

- 中国科学(D辑: 地球科学), 2017, 47(9): 1097-1109.]
- [6] Dong Z B, Hu G Y, Qian G Q, et al. High-altitude aeolian research on the Tibetan Plateau [J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(4): 864-901.
 - [7] Hu Guangyin, Yu Lupeng, Dong Zhibao, et al. Holocene aeolian activity in the Zoige Basin, northeastern Tibetan Plateau, China [J]. *Catena*, 2018(160): 321-328.
 - [8] Liu Jia, Chen Chao, Qing Ningsheng, et al. Response of water resources to climate change in Zoige, Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(2): 498-508. [刘佳, 陈超, 秦宁生, 等. 青藏高原若尔盖生态区水资源对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 498-508.]
 - [9] Shen Caiming, Tang Lingyu, Wang Sumin. Vegetation and climate in Ruorgai area since 250 000 years [J]. *Chinese Journal of Micropaleontology*, 1996, 13(4): 373-385. [沈才明, 唐领余, 王苏民. 若尔盖地区25万年以来的植被与气候[J]. 微体古生物学报, 1996, 13(4): 373-385.]
 - [10] Zong Guanfu, Xu Qinqi, Chen Wanyong. Note on the late pleistocene mammalia fossils in the Apa Zangzu Zizhizhou [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 1985, 23(2): 161-166. [宗冠福, 徐钦琦, 陈万勇. 阿坝藏族自治州若尔盖晚更新世地层及哺乳类化石[J]. 古脊椎动物学报, 1985, 23(2): 161-166.]
 - [11] Huang Chunchang. The river paleo-flood deposits in Zoige Basin and its enlightenment to the evolution of the Yellow River system [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 612-625. [黄春长. 若尔盖盆地河流古洪水沉积及其对黄河水系演变问题的启示[J]. 地理学报, 2021, 76(3): 612-625.]
 - [12] Wang Xianyan, Liu Ya, Su Qi, et al. Late Quaternary terrace formation from knickpoint propagation in the headwaters of the Yellow River, NE Tibetan Plateau [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, 46: 2788-2806.
 - [13] Jia Yana, Zhang Yuzhu, Huang ChunChang, et al. Late Pleistocene-Holocene aeolian loess-paleosol sections in the Yellow River source area on the northeast Tibetan Plateau: chronostratigraphy, sediment provenance, and implications for paleoclimate reconstruction [J]. *Catena*, 208: 105777.
 - [14] Chen Yinglu, Huang ChunChang, Zhang Yuzhu, et al. Palaeo-flood events during the last deglaciation in the Yellow River source area on the northeast Tibetan Plateau [J]. *Geological Journal*, 2021, 56: 4293-4309.
 - [15] Sheng Haiyang, Wang Feiyue. The structural characteristics and evolution of the Zoige Basin in the upper reaches of the Yellow River [J]. *Yellow River*, 2008, 30(7): 9-11. [盛海洋, 王飞跃. 黄河上游若尔盖盆地的构造特征及其演化[J]. 人民黄河, 2008, 30(7): 9-11.]
 - [16] Wang Sumin, Xue Bin. A comparative study on the environmental evolution of the Zoige Basin and the Loess Plateau since the Middle Pleistocene [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 1996, 26(4): 323-328. [王苏民, 薛滨. 中更新世以来若尔盖盆地环境演化与黄土高原比较研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1996, 26(4): 323-328.]
 - [17] Lv Lianqing, Fang Xiaomin, Lu Huayu, et al. Millennium-scale climate change recorded by the grain size of loess on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(11): 1091-1098. [吕连清, 方小敏, 鹿化煜, 等. 青藏高原东北缘黄土粒度记录的末次冰期千年尺度气候变化[J]. 科学通报, 2004, 49(11): 1091-1098.]
 - [18] Zheng Benxing, Wang Sumin. A study on the paleo-glaciation and paleoenvironment in the source area of the Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(3): 210-218. [郑本兴, 王苏民. 黄河源区的古冰川与古环境探讨[J]. 冰川冻土, 1996, 18(3): 210-218.]
 - [19] Wang Jianbing, Wang Suping, Wang Zhigui. Change trend of potential evapotranspiration and surface moisture of Zoige wetland from 1971 to 2010 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 35(2): 245-250. [王建兵, 王素萍, 汪治桂. 1971—2010年若尔盖湿地潜在蒸散量及地表湿润度的变化趋势[J]. 地理科学, 2015, 5(2): 245-250.]
 - [20] Sun Xiaohong, Zhao Yan, Li Quan. The holocene peatland development and vegetation changes in Zoige Basin, eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2017, 47(9): 1097-1109. [孙晓红, 赵艳, 李泉. 青藏高原东部若尔盖盆地全新世泥炭地发育和植被变化[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2017, 47(9): 1097-1109.]
 - [21] Hu Guangyin, Dong Zhibao, Lu Junfeng, et al. Study on desertification and landscape pattern changes in Zoige Basin [J]. *Chinese Desert*, 2013, 33(1): 16-23. [胡光印, 董治宝, 逯军峰, 等. 若尔盖盆地沙漠化及其景观格局变化研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 16-23.]
 - [22] Hu G Y, Dong Z B, Lu J F, et al. The developmental trend and influencing factors of aeolian desertification in the Zoige Basin, eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Aeolian Research*, 2015, 19: 275-281.
 - [23] Hu Guangyin, Dong Zhibao, Zhang Zhengcai, et al. Sand-generating wind conditions and characteristics of sand transport potential in Zoige Basin [J]. *Chinese Desert*, 2020, 40(5): 20-24. [胡光印, 董治宝, 张正偲, 等. 若尔盖盆地起沙风风况与输沙势特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 20-24.]
 - [24] Chen Wenhui, Zeng Cheng. Calculation and analysis of wandering river water surface profile in Maqu section of the upper reaches of the Yellow River [J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2017, 53(6): 9-13. [陈文辉, 曾诚. 黄河上游玛曲段游荡型河道水面线计算分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2017, 53(6): 9-13.]
 - [25] Rong Xiaoqing. OSL dating of Jiayangma section in Zoige Basin, eastern Qinghai-Tibet Plateau and its significance [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2020. [戎晓庆. 青藏高原东部若尔盖盆地甲央玛剖面OSL测年及其意义[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.]
 - [26] Weltje G J. End-member modeling of compositional data: numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem [J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29(4): 503-549.
 - [27] Weltje G J, Prins M A. Genetically meaningful decomposition of grain-size distributions [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 202(3): 409-424.
 - [28] Dietze E, Hartmann K, Diekmann B, et al. An end-member algorithm for deciphering modern detrital processes from lake sediments of Lake Donggi Cona, NE Tibetan Plateau, China [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 243-244: 169-180.
 - [29] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(12): 4494-4506.
 - [30] Ha Hun Jun, Chang Tae Soo, Ha Ho Kyung. Using end-member analysis to determine sediment dispersal and depositional processes on the Heuksan mud belt, southwest Korean shelf [J]. *Geo-Marine Letters*, 2021, 41(1): 1-13.
 - [31] Morgane Derrien, Mi-Hee Lee, Kwangsoon Choi, et al. Tracking the evolution of particulate organic matter sources during summer storm events via end-member mixing analysis based on spectroscopic proxies [J]. *Chemosphere*, 2020, 252: 126445.
 - [32] Zhong Ning, Jiang Hanchao, Li Haibing, et al. Endmember in-

- version of grain size of lacustrine sediments in Xinmocun in the upper reaches of the Minjiang River and its recorded structural and climatic events [J]. *Acta Geology*, 2020, 94 (3): 968-981. [钟宁, 蒋汉朝, 李海兵, 等. 岷江上游新磨村湖相沉积物粒度端元反演及其记录的构造和气候事件[J]. *地质学报*, 2020, 94(3): 968-981.]
- [33] Lin Zhenkun, Wang Aijun, Ye Xiang. End-member analysis of surface sediments in the underwater delta of the Nanlijiang River Estuary and its sedimentary dynamic environment significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37 (1): 124-134. [林镇坤, 王爱军, 叶翔. 南流江河口水下三角洲表层沉积物端元分析及其沉积动力环境意义[J]. *沉积学报*, 2019, 37(1): 124-134.]
- [34] Li Yue, Song Yougui, Zong Xiulan, et al. Dust accumulation process indicated by end-member grain size of loess in the northern foothills of Yili Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(1): 162-177. [李越, 宋友桂, 宗秀兰, 等. 伊犁盆地北部山麓黄土粒度端元指示的粉尘堆积过程[J]. *地理学报*, 2019, 74(1): 162-177.]
- [35] Zhu Hai, Zhang Yufen, Li Changan. The application of end-element analysis in the identification of paleo-floods in the Wuhan section of the Yangtze River [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(2): 297-305. [朱海, 张玉芬, 李长安. 端元分析在长江武汉段古洪水识别中的应用[J]. *沉积学报*, 2020, 38(2): 297-305.]
- [36] Zhang Weiyan, Zhang Xiaoyu, Jin Haiyan, et al. Analysis of sedimentary dynamic environment and provenance of the Yangtze River Estuary-Hangzhou Bay and its adjacent sea area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 640-650. [章伟艳, 张霄宇, 金海燕, 等. 长江口—杭州湾及其邻近海域沉积动力环境及物源分析[J]. *地理学报*, 2013, 68(5): 640-650.]
- [37] Zhang Tingxi, Wen Yingting, Dong Danping, et al. Grain size characteristics and sedimentary environment of surface sediments in the northwestern part of Taihu Lake [J]. *Lake Science*, 2018, 30(3): 836-846. [章婷曦, 文莹亭, 董丹萍, 等. 太湖西北部表层沉积物粒度特征与沉积环境[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(3): 836-846.]
- [38] McLaren P, Bowles D. The effects of sediment transport on grain size distributions [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1985, 55(4): 457-470.
- [39] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3-26.
- [40] Wang Yunfei, Wang Sumin, Xue Bin, et al. Sedimentological basis during the era when the Yellow River seized the ancient Lake Ruergai [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(8): 723-725. [王云飞, 王苏民, 薛滨, 等. 黄河袭夺若尔盖古湖时代的沉积学依据[J]. *科学通报*, 1995, 40(8): 723-725.]
- [41] Sang P N, Liu Zhifei. Terrigenous sediment variations in the western South China Sea and their implications to East Asian monsoon evolution during the last glacial-interglacial cycle [J]. *Journal of Oceanography*, 2011(580): 1-10.
- [42] Fu Yu, Hao Qingzhen, Peng Shuzhen, et al. Clay mineralogy of the Stari Slankamen (Serbia) loess-paleosol sequence during the last glacial cycle: Implications for dust provenance and interglacial climate [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 263: 106990.

Formation of the sedimentary stratigraphy at the first bend of the Yellow River in the Zoige Basin

WANG Zhaoduo¹, HUANG Chunchang², ZHOU Yali², RONG Xiaoqing³, ZHA Xiaochun²,
PANG Jiangli², CUAN Yuda³, SHANG Ruiqing²

(1. School of Geography and Tourism, Huanggang Normal University, Huanggang 438000, Hubei, China; 2. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710016, China; 3. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: After a detailed field investigation in the Zoige Basin, a clear, representative and complete sedimentary stratigraphic profile was discovered on the bank of the first bend of the Yellow River. Through the observation and analysis of sedimentological and stratigraphic characteristics and sedimentary facies, combined with laboratory grain size analysis, data processing and dating. The results show that the blue-gray paleolacustrine sedimentary layer in the lower part of the profile reflects the deep closed lake in the basin before the OSL age of 35 ka. The alternate layer of sand and peat covered on it reflects that after the disappearance of the paleolake at 30 ka, peat swamps appeared at the bottom of the paleolake, and the effect of sandstorms prevailed at the same time. The turbid yellow-orange paleoflood sedimentary layer (OFD1) reflects that between 30~27 ka, large-scale floods from the source area of the Yellow River entered the Zoige Basin, flooded at the bottom of the paleolake and carried good sorting. Fine sand and silt sand are accumulated. The floodplain-aeolian sand layer with a thickness of 5~7 m in the middle of the section can be seen as undulating paleo-sand dunes when traced along the river bank. This strongly indicates that during the last glacial peak and deglacial period, the climate was arid and cold, the Yellow River had been cut down to form its channel, and its floodplain sediments were blown up by the strong wind to form rolling sand dunes. The turbid yellow-orange paleo-flood sedimentary layer (OFD2) covered on this layer reflects that in the 9.86~8.28 ka of early Holocene, the flood from the source area of the Yellow River entered the basin again and deposited on the paleo lake bottom on both sides of the first bay of the Yellow River. Good sorting of fine sand and silty sand. After the mid Holocene, wind-sand action was still prevailing in the Zoige Basin, the Yellow River trough was deep cut, and both banks of the First Bay received sand-storm deposits. Under relatively warm and humid climatic conditions in the mid-Holocene, sand-dust storm sediments were transformed into subalpine meadow black soil at any time, with extremely high maturity. Since the late Holocene, the process of wind-sand and sand-dust storm deposition has continued, and the sand-dust storm sediments have also been transformed into subalpine meadow black soil layers. The research in this paper has important scientific significance for the in-depth understanding of environmental changes and the evolution of surface processes in the source region of the Yellow River and the climate and hydrological changes since the Late Pleistocene.

Key words: first bend of the Yellow River; Last Glacial; Holocene; environmental changes; Zoige Basin

(责任编辑: 赵井东)